Tiago Rodrigues Sarmento Branco
Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Evolução e Comparação das Características de Argamassas de Cal Aérea com adição de Metacaulino

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil - Perfil de Construção

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

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

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Luís Armando Canhoto Neves
Arguente: Prof. Doutora Maria Isabel Torres
Vogais: Prof. Doutora Maria Paulina Faria Rorigues
Prof. Doutora Maria do Rosário Veiga

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Janeiro de 2013

‘Copyright” Tiago Rodrigues Sarmento Branco, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm 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 objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Pretendo, primeiramente, agradecer a todos aqueles que foram importantes no desenvolvimento desta dissertação:

À Doutora Paulina Faria, Professora Associada na Secção de Construção e Hidráulica do DEC/FCT/UNL e orientadora desta dissertação, gostaria de manifestar um especial obrigado pela disponibilidade, empenho e dedicação manifestada, pela incansável orientação científica, pela revisão do texto, esclarecimentos, opiniões e sugestões, sempre com rigor e simpatia. Uma pessoa marcante no meu percurso académico e por quem nutro a maior admiração.

À Doutora Rosário Veiga, Chefe do Núcleo de Revestimento e Isolamentos do LNEC, co-orientadora da dissertação, pelo acompanhamento e supervisão dos procedimentos realizados no LNEC, pela disponibilidade e conhecimentos transmitidos na revisão dos textos finais, pelos quais quero expressar um sincero agradecimento.

Ao Vítor Silva, bolseiro da FCT-UNL, pela dedicação e amizade demonstrada ao longo destes meses, pelo empenho no acompanhamento e colaboração na fase experimental, fulcral para a realização precisa dos ensaios e pelas opiniões e sugestões importantes para a análise e tratamento de resultados obtidos.

Ao João Carneiro, companheiro de trabalho, pelo apoio e amizade durante o processo de execução experimental que se traduziu em inúmeras horas passadas nos laboratórios do DEC/FCT-UNL. Pelo empenho colocado na coordenação de algumas das tarefas inerentes ao processo experimental.

Ao André Gameiro, bolseiro do projeto FCT-MEC METACAL, por todo o apoio prestado na realização dos ensaios químicos e mineralógicos, operados no LNEC.

Ao Doutor António Santos Silva, Investigador Auxiliar no NMM/DM do LNEC pelo apoio e conhecimentos transmitidos na elaboração dos ensaios químicos e mineralógicos.

Aos colegas de curso André Bandeira, Carlos Rodrigues, Duarte Mergulhão Gonçalo Simões, João Brito, João Grilo, e Ricardo Vieira, pelo auxílio demonstrado na execução de alguns dos trabalhos experimentais.

Finalmente, e sendo este trabalho, o término de um longo período académico, gostaria de endereçar o meu agradecimento a algumas pessoas em particular:

À minha Mãe, por proporcionar-me a possibilidade da realização deste percurso académico e pela paciência, incentivo, e compreensão ao longo do mesmo.

À Anna, pelo apoio, companheirismo e paciência demonstrada, sem os quais tudo teria sido mais difícil.

À minha família e amigos, a todos eles, gostaria de demonstrar o meu maior e profundo agradecimento por todo o apoio moral transmitido ao longo deste trabalho e da minha vida académica.

RESUMO

O uso de argamassas de cimento difundiu-se durante o século XX, por permitir obter resistências mecânicas elevadas num tempo de cura reduzido. Porém a utilização deste tipo de argamassas em intervenções de reabilitação ou conservação de estruturas antigas apresenta incompatibilidades com os suportes de alvenaria, provocando anomalias que obrigam em muitos casos a novas intervenções.

Torna-se dessa forma urgente o desenvolvimento de argamassas de reparação que sejam duráveis e compatíveis com as alvenarias.

Desde a antiguidade que as argamassas de cal aérea, com ou sem adição de pozolanas, são utilizadas na construção, apresentando em muitos casos uma elevada durabilidade.

O metacaulino permite reduzir o período de endurecimento das argamassas, conferindo-lhes características hidráulicas, mas não atingindo porém resistências mecânicas demasiado elevadas, o que permite uma melhor compatibilização com o suporte.

Esta dissertação, realizada no âmbito dos projectos FCT-MEC METACAL e LIMECONTECH, descreve o estudo efetuado sobre argamassas de cal aérea com três traços volumétricos, com eventual substituição parcial de massa de cal por metacaulino, quando expostas a uma cura húmida. As argamassas são caracterizadas aos 28 e 90 dias, em termos mecânicos, físicos, químicos e mineralógicos.

Os resultados obtidos demonstram que o aumento do teor em metacaulino tem um maior impacto sobre as características mecânicas do que o aumento do traço em ligante, o qual pode conferir valores excessivamente elevados às argamassas para aplicação em rebocos. Os benefícios da introdução do metacaulino como ligante verificam-se igualmente na obtenção de valores mais baixos de coeficiente de capilaridade (para os traços mais fortes em ligante e metacaulino) e de condutibilidade térmica (traço volumétrico 1:3).

Nos restantes parâmetros analisados, o efeito do metacaulino revelou-se ambíguo quanto à melhoria do desempenho face ao ataque dos sulfatos e das características de secagem e efetivamente pouco benéfico pelo aumento do total de água absorvida por capilaridade.

PALAVRAS – CHAVE:

Argamassa, ligante, cal aérea, metacaulino, condição de cura, traço volumétrico.

ABSTRACT

The use of cement mortars spread throughout the nineteenth century, due to the high mechanical resistance obtained by its use and the reduced healing time. However, the use of this type of mortar in rehabilitation interventions or conservation of older structures presents serious incompatibilities with the background masonry, causing anomalies that require, in many cases, additional interventions.

It is thus urgent to develop repair mortars that are durable and compatible with the masonry.

Since ancient times, lime mortar with or without the addition of pozzolans has been used for construction and presents low levels of degradation.

Metakaolin permits a reduction in the hardening time of mortars, granting them hydraulic characteristics, not reaching however, mechanical strengths as high as those from cement, allowing a better compatibility with the support.

This work, which was conducted under the projects FCT-MEC METACAL and LIMECONTECH, describes the study on lime based mortars with three different volumetric ratios, with and without partial substitution of lime weight by metakaolin, when exposed to a moist curing condition. The mortars are characterized at 28 and 90 days and subjected to mechanical, physical, chemical, and mineralogical tests.

The results show that the increasing content of metakaolin has a greater impact on mechanical properties than the increase in the binder ratio, which provides excessively high values to mortar regarding plasters application. The benefits of metakaolin introduction in the binder matrix are notorious in lower capillarity coefficient values (for highest lime + metakaolin ratios) and thermal conductivity (volumetric ratio of 1:3).

Regarding other parameters, the effect of metakaolin proved to be ambiguous regarding the improvement of the performance against sulfates attack and drying characteristics. It proved to be harmful due to the slightly increasing amount of water absorbed by capillarity.

KEYWORDS:

Lime mortar, binder, aerial lime, metakaolin, curing conditions, volumetric ratio.

ÍNDICE

RESUMO I
ABSTRACT III

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. ENQUADRAMENTO 1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA 2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO 3

2. ESTADO DO CONHECIMENTO 5

2.1. UTILIZAÇÃO HISTÓRICA DE ARGAMASSAS 5
2.2. DESVANTAGENS INERENTES À UTILIZAÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO 5
2.3. REAÇÃO DE CARBONATAÇÃO 8
2.4. REAÇÃO POZOLÂNICA 9
2.5. POZOLANAS: O METACAULINO 11
2.5.1. Vantagens da adição do metacaulino a argamassas de cal aérea 12
2.6. INFLUÊNCIA DO METACAULINO SOBRE AS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS 13
2.7. INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO ÁGUA / LIGANTE 17
2.8. ABSORÇÃO CAPILAR 18
2.9. POROSIDADE ABERTA 19
2.10. SECAGEM 20
2.11. EFEITO DA CONDIÇÃO DE CURA 21
2.12. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA 21
2.13. TERMOGRAVIMETRIA 22
2.14. DIFRAÇÃO POR RAIOS X 23

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL 25

3.1. PLANEAMENTO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL 25
3.1.1. Detalhe das misturas 25
3.1.2. Descrição dos materiais utilizados 27
3.1.2.1. Ligante 27
3.1.2.2. Pozolana 27
3.1.2.3. Agregados 28
3.1.3. Caracterização da condição de cura 29
3.1.4. Ensaios realizados 29
3.2. REALIZAÇÃO DOS PROVETES E CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO 30
3.2.1. Considerações gerais 30
3.2.2. Amassadura 32
3.2.3. Determinação da consistência por espalhamento 34
3.2.4. Execução dos provetes 35
3.2.5. Desmoldagem e colocação na cura húmida 36
3.3. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS AOS 28 E 90 DIAS - ENSAIOS 38
3.3.1. Módulo de elasticidade dinâmico 39
3.3.2. Determinação da resistência à tracção por flexão 40
3.3.2.1. Procedimento do ensaio de R_T aos 28 dias na FCT-UNL 41
3.3.2.2. Procedimento do ensaio aos 90 dias realizado no LNEC 42
3.3.3. Determinação da resistência à compressão 42
3.3.3.1. Procedimento do ensaio de R_C aos 28 dias na FCT-UNL 43
3.3.3.2. Procedimento do ensaio de R_C aos 90 dias no LNEC 43
3.3.4. Determinação da absorção de água por capilaridade 44
3.3.4.1. Diferenças de procedimento dos 28 para os 90 dias 46

3.3.5. Ensaio de secagem 47
3.3.6. Ensaio de determinação da porosidade aberta 49
3.3.7. Ensaios químicos e mineralógicos 51
3.3.7.1. Preparação das amostras 51
3.3.7.2. Análise por difração de raios X 53
3.3.7.3. Análise termogravimétrica e por diferencial térmico (TG – ADT) 54
3.3.8. Ensaio de condutibilidade térmica 55
3.3.9. Ensaio de ataque dos sulfatos 57

4. ANÁLISE E TRATAMENTO DE RESULTADOS 59

4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS 59
4.1.1. Baridade 59
4.1.2. Traço ponderal e relação água / ligante 60
4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO 61
4.2.1. Consistência por espalhamento 61
4.2.1.1. Variação do espalhamento devido ao ajuste da relação A/ (L+Mk) 62
4.3. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO 63
4.3.1. Módulo de elasticidade dinâmico 64
4.3.1.1. Influência do traço volumétrico 65
4.3.1.2. Influência do aumento do teor em metacaulino por substituição da massa de cal aérea 66
4.3.2. Resistência à tração por flexão 66
4.3.2.1. Influência do traço volumétrico 68
4.3.2.2. Influência do aumento do teor em metacaulino por substituição da massa de cal aérea 68
4.3.3. Resistência à compressão 69
4.3.3.1. Influência do traço volumétrico 70
4.3.3.2. Influência do aumento do teor em metacaulino por substituição da massa de cal aérea 71
4.3.4. Absorção de água por capilaridade 71
4.3.4.1. Influência do traço volumétrico 75
4.3.4.2. Influência do aumento do teor em metacaulino por substituição da massa de cal aérea 77
4.3.5. Ensaio de secagem 80
4.3.5.1. Influência do traço volumétrico 82
4.3.5.2. Influência do aumento do teor em metacaulino por substituição da massa de cal aérea 84
4.3.6. Porosidade aberta 87
4.3.7. Ensaios químicos, mineralógicos e microestruturais 89
4.3.8. Condutibilidade térmica 89
4.3.9. Resistência à ação dos sulfatos 90

5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS 93

5.1. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS 97
5.1.1. Variação entre argamassas originais e de substituição 99
5.1.2. Comparação de resistências entre argamassas sem adição de metacaulino 101
5.1.3. Comparação de resistências entre argamassas com metacaulino 102
5.1.4. Comparação de resistências entre argamassas com 30% de teor em metacaulino 104
5.1.5. Comparação de resistências entre argamassas com 50% de teor em metacaulino 105
5.1.6. Comparação de resistências entre argamassas de traço volumétrico 1:3 106
5.1.7. Comparação entre as Características Mecânicas de L3 e AH 108
5.2. COMPORTAMENTO FACE À ÁGUA 109
5.2.1. Características de absorção capilar 109
5.2.1.1. Variação entre argamassas originais e de substituição 110
5.2.1.2. Comparação entre as curvas de Absorção Capilar de L3 e AH 111
5.2.2. Características de secagem 112
5.2.2.1. Variação entre argamassas originais e de substituição 112

5.2.2.2. Comparação entre as curvas de Secagem de L3 e AH 113
5.2.3. Relação entre secagem e absorção capilar 114
5.3. ESTRUTURA POROSA 117
5.3.1. Porosidade aberta 117
5.3.1.1. Comparação entre os valores de Porosidade aberta de L3 e AH 117
5.3.1.2. Variação entre argamassas originais e de substituição 118
5.3.2. Relação entre Porosidade Aberta e Valor Assimptótico 119
5.3.3. Condutibilidade térmica 120
5.3.4. Relação entre Porosidade Aberta e Condutibilidade Térmica 120
5.4. COMPORTAMENTO FACE AOS SULFATOS, RESISTÊNCIAS MECÂNICAS E ESTRUTURA POROSA 122
6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 125
6.1. CONCLUSÕES GERAIS 125
6.2. TRABALHOS FUTUROS 129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 131
ANEXO I – DADOS CLIMÁTICOS DA SALA DE CURA HÚMIDA 135
ANEXO II – RESULTADOS DO ENSAIO DE CONSISTÊNCIA POR ESPLHAMENTO 139
ANEXO III – RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS DE CADA PROVETE 143
ANEXO IV – RESULTADOS DOS ENSAIOS FÍSICOS DE CADA PROVETE 149
ANEXO V – ENSAIOS QUÍMICOS E MINERALÓGICOS 155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Evolução de R_C e R_T dos 28-365 dias de provetes de argamassas com diferentes traços ponderais 14
Figura 2.2 - Valores de resistência à flexão e compressão de argamassas com adição de metacaulinos obtidos a 3 idades distintas por Faria. 15
Figura 2.3 - Valores de resistência à flexão e compressão de argamassas com adição de metacaulino obtidos a 3 idades distintas por Velosa..... 16
Figura 2.4 - Efeito dos parâmetros estudados por Billong sobre a absorção de água. 17
Figura 2.5 - Variação da condutibilidade térmica dos rebocos com o teor de humidade. 22
Figura 3.1 - Saco da areia APAS 30. 28
Figura 3.2 - Pesagem dos constituintes secos e homogeneização manual. 33
Figura 3.3 - Transferência dos constituintes secos para a cuba e amassadura mecânica na misturadora... 33
Figura 3.4 - Ensaio de consistência por espalhamento: colocação do cone e preenchimento em 2 camadas. 34
Figura 3.5 - Ensaio de consistência por espalhamento: indução de 15 pancadas e medição dos diâmetros de contorno. 35
Figura 3.6 - Compactador e preenchimento do molde por camadas no compactador. 36
Figura 3.7 - Provetes nos moldes após compactação à esquerda e selados em sacos de polietileno à direita. 36
Figura 3.8 - Desmoldagem dos provetes com Mk; transferência dos provetes sem Mk para cura de referência sem sacos polietileno. 37
Figura 3.9 - Rutura de provete durante manuseamento; transporte para cura húmida sobre lateral do molde; retração no molde de provetes da argamassa L1. 38
Figura 3.10 - Colocação e disposição dos provetes na sala da cura húmida. 38
Figura 3.11 - "Zeus Resonance Meter" e output do programa de cálculo para determinação do Edin..... 40
Figura 3.12 - Ensaio de resistência à tracção por flexão operado pelo equipamento "ZWICK Z050". 40
Figura 3.13 - Disposição transversal e longitudinal do provete no suporte para realização do ensaio de resistência à tração por flexão. 41
Figura 3.14 - Disposição dos provetes no equipamento de ensaio de R_T do LNEC. 42
Figura 3.15 - Disposição do provete no suporte para ensaio de Resistência à Compressão e formação de rótulas plásticas após aplicação da carga. 43
Figura 3.16 - Preparação do ensaio de absorção por capilaridade aos 28 dias, retirada dos provetes da estufa caixa onde decorre a absorção verificação da altura de água necessária. 44
Figura 3.17 - Disposição dos provetes nas caixas durante o ensaio de absorção capilar aos 28 dias e 90 dias. 46
Figura 3.18 - Disposição dos provetes no decorrer do ensaio de secagem. 47
Figura 3.19 - Determinação da Porosidade aberta: amostras no exsicador ligado a bomba de vácuo. 50
Figura 3.20 - Determinação de Pab aos 90 dias: método de colocação das amostras nos collants e disposição no exsicador. 51
Figura 3.21 - Preparação das Frações Finas. 52
Figura 3.22 - Material necessário à preparação das Amostras Globais. 52
Figura 3.23 - Porta Amostras e Difractómetro Philips PW3710. 53
Figura 3.24 - Esquema da ação dos feixes de raios X. 54
Figura 3.25 - Equipamento SETRAM TG-DTA. 55
Figura 3.26 - Aparelho ISOMET 2104 e sonda de superfície durante medição 56
Figura 3.27 - Acondicionamento dos meios provetes na estufa e disposição dos provetes dentro da caixa com solução de Na2SO4. 57
Figura 3.28 - Meios provetes imersos na solução e meios provetes de L1_Mk50 fendilhados ao fim do 5º ciclo. 58

Figura 4.1 - Valores médios de consistência por espalhamento e da relação água/ligante (cal + metacaulino). 62
Figura 4.2 - Comparação entre os valores de E_{din} aos 28 e 90 dias para o conjunto de todas as argamassas..... 64
Figura 4.3 - Comparação entre os valores de R_T aos 28 e 90 dias para o conjunto de todas as argamassas..... 67
Figura 4.4 - Comparação entre os valores de R_C aos 28 e 90 dias para o conjunto de todas as argamassas..... 69
Figura 4.5 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias de todas as argamassas, sem impermeabilização lateral..... 72
Figura 4.6 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 90 dias de todas as argamassas, com impermeabilização lateral..... 72
Figura 4.7 - Comparação aos 28 e 90 dias dos Valores Assimptóticos e dos Coeficientes de Capilaridade de todas as argamassas. 74
Figura 4.8 - Evolução das curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas sem Mk. 75
Figura 4.9 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas com 30% de Mk. 76
Figura 4.10 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas com 50% de Mk. 76
Figura 4.11 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas de traço volumétrico 1:3. 77
Figura 4.12 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas de traço volumétrico 1:2. 78
Figura 4.13 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas de traço volumétrico 1:1. 79
Figura 4.14 - Curvas de evaporação das argamassas aos 28 dias de todas as argamassas, sem impermeabilização lateral..... 80
Figura 4.15 - Curvas de evaporação das argamassas aos 90 dias de todas as argamassas, com impermeabilização lateral..... 80
Figura 4.16 - Índice de Secagem e Taxa de Secagem aos 28 dias de todas as argamassas. 81
Figura 4.17 - Índice de Secagem e Taxa de Secagem aos 90 dias de todas as argamassas. 82
Figura 4.18 - Curvas de secagem das argamassas sem substituição de cal aérea por Mk. 83
Figura 4.19 - Curvas de secagem das argamassas com 30% de Mk. 83
Figura 4.20 - Evolução das curvas de secagem das argamassas com 50% de Mk. 84
Figura 4.21 - Evolução das curvas de secagem das argamassas de traço volumétrico 1:3. 85
Figura 4.22 - Evolução das curvas de secagem das argamassas de traço volumétrico 1:2. 85
Figura 4.23 - Curvas de secagem das argamassas de traço volumétrico 1:1. 86
Figura 4.24 - Porosidade aberta aos 28 e aos 90 dias para o conjunto de todas as argamassas. 87
Figura 4.25 - Valores de condutibilidade térmica aos 135 dias para o conjunto de todas as argamassas. . 89
Figura 4.26 - Variação da massa média por ação dos sulfatos das argamassas em cura húmida até aos 28 dias. 91
Figura 4.27 - Variação da massa média por ação dos sulfatos das argamassas em cura húmida até aos 90 dias. 91
Figura 4.28 - Variação de massa das argamassas ao 7º ciclo do ensaio de resistência aos sulfatos. 92
Figura 5.1 - Comparação das características mecânicas aos 28 dias..... 97
Figura 5.2 - Comparação das características mecânicas aos 90 dias..... 97
Figura 5.3 - Características mecânicas das argamassas aos 90 dias e gamas de valores de Veiga. 98
Figura 5.4 - R_C aos 28 dias das argamassas e valor mínimo indicado pela norma EN 998-1. 99
Figura 5.5 - Comparação da variação de R_T e R_C com a variação da quantidade de água de amassadura das argamassas originais e suas substituições. 100
Figura 5.6 - Comparação das características mecânicas das argamassas sem metacaulino aos 28 e 90 dias. 101
Figura 5.7 - DRX das argamassas sem substituição parcial de cal aérea por Mk aos 28 e 90 dias. 101
Figura 5.8 - Percentagem total de cal aérea consumida através da reação pozolânica e da reação de carbonatação..... 103
Figura 5.9 - DRX das argamassas com substituição de 30% da massa de cal por Mk aos 28 e 90 dias. . 104
Figura 5.10 - TG das argamassas com substituição de 30% da massa de cal por Mk aos 28 e 90 dias. .. 104

Figura 5.11 - Comparação das resistências mecânicas das argamassas com 50% de Mk aos 28 e 90 dias. 106
Figura 5.12 - Comparação das resistências mecânicas das argamassas de traço volumétrico 1:3 aos 28 e 90 dias..... 106
Figura 5.13 - dTG das argamassas de traço volumétrico 1:3 aos 28 e 90 dias. 107
Figura 5.14 - DRX das argamassas de traço volumétrico 1:3 aos 28 e 90 dias. 107
Figura 5.15 - Comparação de E_{din}, R_T e R_C aos 28 e 90 dias das argamassas L3 com AH. 109
Figura 5.16 - Comparação da variação de CC e VA com a variação da quantidade de água de amassadura entre argamassas originais e suas substituições. 111
Figura 5.17 - Comparação das curvas de absorção capilar aos 28 e 90 dias das argamassas L3 e AH.... 112
Figura 5.18 - Comparação da variação de TS com a variação da quantidade de água de amassadura entre argamassas originais e suas substituições. 113
Figura 5.19 - Comparação das curvas de secagem aos 28 e 90 dias das argamassas L3 e AH. 113
Figura 5.20 - Comparação entre Coeficiente de Capilaridade e Taxa de Secagem aos 28 e 90 dias de idade de todas as argamassas. 114
Figura 5.21 - Curvas de secagem e de absorção capilar de todas as argamassas aos 28 dias. 115
Figura 5.22 - Curvas de secagem e de absorção capilar de todas as argamassas aos 90 dias. 115
Figura 5.23 - Partículas de argamassa suspensas na água e depositadas no fundo do recipiente durante o ensaio de Porosidade aberta aos 28 dias. 117
Figura 5.24 - Comparação entre os valores de Porosidade aberta aos 28 e 90 dias de L3 E AH. 117
Figura 5.25 - Comparação da variação de CC e VA com a variação da quantidade de água de amassadura entre argamassas originais e suas substituições. 118
Figura 5.26 - Comparação entre os valores de Pab e VA aos 28 e 90 dias de idade de todas as argamassas..... 119
Figura 5.27 - Comparação dos valores de Porosidade Aberta aos 90 dias com os de Condutibilidade Térmica. 121
Figura 5.28 - Resistências mecânicas, porosidade aberta e variação de massa das argamassas ao 7º ciclo aos 28 dias. 122
Figura 5.29 - Resistências mecânicas, porosidade aberta e variação de massa das argamassas ao 12º ciclo aos 90 dias. 122
Figura 5.30 - Efeito da ação dos sulfatos sobre os meios provetes nas argamassas L3, L3_Mk30 e L1_MK50 123

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Designação das argamassas. 26
Quadro 3.2 – Provetes de cada argamassa utilizados nos ensaios realizados aos 28 e 90 dias. 26
Quadro 3.3 – Requisitos químicos de cal aérea dados por valores característicos. 27
Quadro 3.4 – Composição química do metacaulino Argical M1200 S. 27
Quadro 3.5 – Proporções em volume dos constituintes sólidos das argamassas para cada traço volumétrico 28
Quadro 3.6 – Mapa de quantidades dos constituintes utilizados por argamassa. 31
Quadro 4.1 - Valores de baridade das matérias-primas. 59
Quadro 4.2 - Traços ponderais e relação água / ligante das argamassas. 60
Quadro 4.3 - Valores de consistência por espalhamento. 61
Quadro 4.4 - Valores médios e desvio-padrão do Módulo de elasticidade dinâmico (Edin) aos 28 e 90 dias 64
Quadro 4.5 - Valores médios e desvio-padrão de Resistência à tração por flexão aos 28 e 90 dias. 66
Quadro 4.6 - Valores médios e desvios-padrão de Resistência à compressão aos 28 e 90 dias. 69
Quadro 4.7 - Valores médios e desvios-padrão dos Valores Assimptóticos e Coeficientes de Capilaridade de todas as argamassas aos 28 e 90 dias. 73
Quadro 4.8 - Valores médios e desvio-padrão do Índice e Taxa de Secagem das argamassas aos 28 e 90 dias. 81
Quadro 4.9 -Valores médios e desvios-padrão de Porosidade aberta aos 28 e 90 dias. 87
Quadro 4.10 - Valores médios e desvio-padrão da condutibilidade térmica determinada aos 135 dias de idade de argamassas que estiveram em cura húmida até aos 28 dias. 89
Quadro 5.1 - Resultados globais de caracterização das argamassas aos 28 e 90 dias de idade. 93
Quadro 5.2 - Tendência de evolução dos parâmetros das argamassas com Mk face a L3 e L2 e L1. 94
Quadro 5.3 - Tendência de evolução dos parâmetros das argamassas sem Mk face a L3. 96
Quadro 5.4 – Parametrização de valores aceitáveis de resistências mecânicas aos 90 dias consoante o tipo de aplicação da argamassa em edifícios antigos. 98
Quadro 5.5 – Valores de R_T e R_C das argamassas originais e suas substituições. 100
Quadro 5.6 - Valores de CC e VA das argamassas originais e suas substituições. 110
Quadro 5.7 - Valores de TS das argamassas originais e suas substituições. 113
Quadro 5.8 - Valores de Pab das argamassas originais e suas substituições. 118
Quadro 5.9 -Valores de Condutibilidade térmica (à esq.) e Porosidade aberta (à dir.) obtidos por Vejmelková et al. 120

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Argamassas para rebocos compostas por cal aérea combinada com pozolanas são usadas pelo menos desde os tempos da Roma antiga. A reação da pozolana com a cal forma silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (C-S-H), conferindo às argamassas boas resistências mecânicas quando expostas ao meio ambiente. Rebocos com vários séculos conservaram-se até aos dias de hoje; indicando assim que a utilização de rebocos de argamassas à base de cal aérea com adição de pozolanas em intervenções de reabilitação é possível uma vez que fornece compatibilidade física, química e estética com os suportes, aliado a uma grande durabilidade no tempo (VEJMELKOVA et al., 2012).

"O uso da cal aérea foi sendo excluído das construções, sobretudo pelo aparecimento do cimento. Hoje procura-se retomar a aplicação da cal na recuperação de edifícios antigos, mas os construtores, de uma maneira geral, rejeitam esta opção dado que o processo de endurecimento é muito diferente quando comparado com o dos ligantes hidráulicos, obrigando a tempos de espera bastante alargados entre as várias camadas de aplicação dos revestimentos" (MARGALHA et al., 2006).

As argamassas de cimento não se adequam a aplicação em obras de conservação, devido à sua elevada rigidez, fraca trabalhabilidade, alto teor em sais solúveis (VELOSA et al., 2009) e baixa permeabilidade ao vapor de água (FARIA et al., 2008).

Assim, torna-se imperativo fomentar a aplicação em obras de conservação e restauro e sempre que seja necessária a aplicação de nova argamassa, de argamassas que sejam compatíveis com as alvenarias existentes, utilizando produtos disponíveis no mercado, que se adequem às práticas construtivas atuais (VELOSA, 2007).

Uma solução passa pela utilização de argamassas à base de cal com adições de pozolanas que apresentem propriedades hidráulicas, maior rapidez de endurecimento e possibilidade deste se efetuar mesmo em condições de elevada humidade ambiente e reduzido contacto com o dióxido de carbono.

A nível ambiental, a utilização de argamassas à base de cal aérea com adição de pozolanas traduz-se num menor impacto para o ambiente comparativamente com as argamassas de base cimentícia. Este facto decorre do menor consumo energético associado à produção da cal aérea (produzida sensivelmente a metade da temperatura utilizada para o fabrico do cimento) e da absorção de CO_2 durante o processo de carbonatação (SIDDIQUE et al., 2009).

O metacaulino é uma pozolana artificial produzida a partir do tratamento térmico (a relativamente baixa temperatura) e granulométrico do caulino, que é uma argila muito comum em Portugal.

Em função do exposto e em virtude da necessidade de se aumentar o conhecimento rigoroso das características de argamassas de cal aérea e metacaulino, a presente dissertação procura estudar a evolução das propriedades a idades jovens de argamassas com traços volumétricos com dosagem progressivamente maior em ligante e com diferentes teores de metacaulino, sujeitas a uma condição de cura húmida.

Insere-se num estudo mais amplo, realizado no âmbito dos projetos de investigação FCT-MEC METACAL e LIMECONTECH financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, o primeiro dos quais tem por objetivo a obtenção de progressos científicos no domínio das propriedades intrínsecas aos revestimentos à base de argamassas de cal com metacaulinos e o segundo pretende contribuir para um maior conhecimento relativo à conservação de revestimentos com base em cal.

1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

A presente dissertação tem como objetivo aferir a influência que a variação do traço volumétrico (Ligante:Agregado) e a substituição parcial crescente de massa de cal aérea por metacaulino apresentam sobre as principais características mecânicas, físicas, químicas e mineralógicas de argamassas à base de cal aérea, com vista a contribuir para um maior conhecimento deste tipo de argamassas face à sua aplicabilidade em intervenções de reabilitação de edifícios.

Para tal, formularam-se argamassas com 3 traços volumétricos distintos (1:3, 1:2, 1:1). Com cada traço realizaram-se 3 argamassas com teores crescentes de massa de metacaulino (0%; 30% e 50%) em substituição de massa de cal aérea, perfazendo um total de 9 tipos de argamassas diversas.

Todas as argamassas foram sujeitas a uma cura húmida (95±5% de humidade relativa e a uma temperatura de 23±3°C).

As formulações de argamassas estudadas foram caracterizadas no estado fresco e endurecido. A caracterização no estado fresco foi obtida através da determinação da consistência por espalhamento, após a qual procedeu-se à moldagem dos provetes.

A caracterização no estado endurecido foi efetuada a 2 idades distintas (28 e 90 dias).

A caracterização mecânica cingiu-se à determinação do módulo de elasticidade dinâmico, da resistência à tração por flexão e à compressão.

As caracterizações físicas e de durabilidade das argamassas foram obtidas através da determinação da absorção de água por capilaridade, da secagem, da porosidade aberta, da condutibilidade térmica e da resistência à ação dos sulfatos.

Foram ainda realizados ensaios químicos e mineralógicos, tais como a análise por difração de raios X, análise termogravimétrica e térmica diferencial.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO

O documento da dissertação encontra-se subdividido em 6 capítulos, sendo o primeiro e atual, o capítulo introdutório.

No segundo capitulo, denominado por Estado do conhecimento, apresentam-se os conhecimentos existentes até à data sobre as temáticas estudadas nos capítulos seguintes, nomeadamente o tipo de matérias-primas e as propriedades que a sua combinação confere às argamassas. São igualmente abordados trabalhos de outros autores cujos resultados dos trabalhos experimentais facultem informações relevantes para os parâmetros ensaiados no âmbito desta dissertação.

O terceiro capítulo destina-se à descrição do planeamento da campanha experimental e dos procedimentos das amassaduras e dos ensaios de caracterização no estado fresco e endurecido realizados no decorrer da campanha experimental.

O quarto capítulo reserva-se para a análise e tratamento de resultados, no qual são apresentados os valores obtidos nos diversos ensaios realizados por recurso a gráficos e tabelas. Realiza-se igualmente a leitura das tendências observadas graficamente.

No quinto capítulo, dedicado à discussão de resultados, justificam-se os valores e tendências identificadas no capítulo quatro através da análise conjunta de um ou mais parâmetros obtidos através dos ensaios realizados. Nesta secção é ainda feita uma comparação com resultados de outros trabalhos efetuados sobre as temáticas abordadas.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões consequentes ao procedimento e resultados obtidos na campanha experimental, averiguando se satisfazem os objetivos propostos. São ainda referidas algumas sugestões para trabalhos futuros.

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

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. UTILIZAÇÃO HISTÓRICA DE ARGAMASSAS

O ligante base utilizado para o fabrico de rebocos é, desde a antiguidade a cal aérea, a qual resultava da calcinação do carbonato de cálcio a temperaturas da ordem dos 900ºC, transformando-se em cal aérea, permitindo posteriormente uma rápida hidratação. Se esta for realizada com água abundante, resulta numa cal aérea em pasta.

A pasta de cal formada por hidratação tem após maturação muito boa plasticidade. As matérias-primas usadas para o fabrico de cal continham frequentemente impurezas argilosas, o que conferia às argamassas uma maior resistência ao meio ambiente, aumentando deste modo a vida útil dos rebocos (CERNY et al.,2006).

Argamassas para rebocos compostas por cal aérea combinadas com pozolanas foram usadas desde os tempos da Roma antiga. A reação da pozolana com a cal forma silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) conferindo às argamassas maior durabilidade (VEJMELKOVA et al., 2012).

Derivado das boas resistências mecânicas apresentadas pelas pozolanas combinadas com cal aérea expostas ao meio ambiente, alguns fragmentos de rebocos com vários séculos conservaram-se até aos dias de hoje; assim, a utilização de rebocos de argamassas à base de cal aérea com adição de pozolanas em intervenções de reparação é possível uma vez que fornece compatibilidade física, química, e estética com os suportes aliado a uma grande durabilidade no tempo. (VEJMELKOVA et al., 2012).

Esta ideia é partilhada por Stefanidou et al. (2005), os quais argumentam que o estado de conservação apresentado por monumentos antigos e edifícios históricos atualmente demonstra que as argamassas são materiais duráveis e fiáveis por apresentarem resistências mecânicas mais baixas em comparação com argamassas de cimento. São por isso, ainda hoje usadas para a reparação de monumentos e para o fabrico de revestimentos e rebocos.

Porém, "*o uso da cal aérea foi sendo excluído das construções, sobretudo pelo aparecimento do cimento. Hoje procura-se retomar a aplicação da cal na recuperação de edifícios antigos, mas os construtores, de uma maneira geral, rejeitam esta opção dado que o processo de endurecimento é muito diferente quando comparado com o dos ligantes hidráulicos, obrigando a tempos de espera bastante alargados entre as várias camadas de aplicação dos revestimentos*" (Margalha et al., 2006).

2.2. DESVANTAGENS INERENTES À UTILIZAÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO

A problemática das desvantagens do emprego do cimento em intervenções a nível da reparação e substituição de argamassas foi alvo de diversos estudos até à data: Gartner (2004) realça o

impacto significativo do processo de fabrico do cimento a nível ambiental; Velosa et al. (2009) indicam que a fraca trabalhabilidade, excessiva rigidez e o elevado teor em sais solúveis tornam a sua aplicação inadequada em obras de conservação; Maravelaki-Kalaitzaki et al. (2003) menciona a incompatibilidade estética e os efeitos nocivos que o emprego do cimento em sucessivas intervenções de reparação tem nas alvenarias de pedra adjacentes.

Sendo vasto o leque de razões identificadas, estas podem ser classificadas essencialmente como problemas de carácter ambiental e de compatibilidade com o suporte, que se traduzem numa degradação precoce das alvenarias intervencionadas.

Para produzir o clínquer de cimento Portland é necessário aquecer o calcário num forno cilíndrico a temperaturas entre os 1300-1500 °C. O aumento da temperatura deve processar-se o mais rapidamente possível de forma a conferir as características ideais de presa e resistência ao clínquer. Assim, para produzir uma tonelada de cimento são geradas 0,55 toneladas de CO_2 emitindo adicionalmente 0,39 toneladas de CO_2 em combustível para a cozedura e moagem, o que representa um total de 0,94 toneladas de CO_2 (GARTNER, 2004).

As argamassas à base de cimento Portland foram utilizadas para efeitos de intervenções em conservação e reabilitação durante a maior parte do século XX. No entanto, durante as últimas décadas, a sua aplicação tem sido sucessivamente criticada para esse fim. Diversos autores estudaram esta temática apresentando motivos de diferentes índoles para justificar as desvantagens da aplicação do cimento para os referidos fins.

As argamassas de cimento não se adequam a aplicação em obras de conservação, devido à sua rigidez excessiva, fraca trabalhabilidade e alto teor em sais solúveis (TEUTÓNICO et al., 1994; MOROPOULOU et al., 2005, citados por VELOSA et al., 2009) além de apresentar baixa permeabilidade ao vapor de água (FARIA et al., 2007).

De facto, no que concerne a permeabilidade ao vapor de água, Faria et al. (2007) indicam que a introdução de cal aérea em argamassas bastardas de cimento permite, de um modo geral, o aumento do valor deste parâmetro físico.

Por seu turno, Maravelaki-Kalaitzaki et al. (2003) apontou as limitações físico-químicas, a incompatibilidade mecânica e estética destas argamassas com as alvenarias antigas e com as superfícies arquitetónicas como principais aspetos que tornam as argamassas de cimento inadequadas. Como resultado, diz o autor, observou-se uma evolução do processo de deterioração derivado das intervenções de reparação. O efeito dos subprodutos nocivos, juntamente com as elevadas rigidez e resistências das argamassas de cimento, induzem danos graves aos blocos de pedra adjacentes, quando as argamassas são aplicadas no refechamento de juntas de alvenarias de pedra à vista (MARAVELAKI-KALAITZAKI et al., 2005)

A temática das limitações físico-químicas do cimento foi aprofundada por Moropoulou (2005), a qual reforça que as causas da degradação do cimento podem ser de âmbito físico, influenciadas pela existência de água no interior da alvenaria (fluxo de evaporação capilar, formação

de gelo entre outros) ou de âmbito químico (ataque dos sulfatos, reações álcali-sílica, ou mesmo a formação de produtos expansivos, tais como a etringite e a thaumasite). Ainda em relação a estes compostos de elevado peso molecular, os quais resultam da reação do gesso com alumino-silicatos de cálcio hidratados, importa referir que a etringite, provoca a fendilhação da argamassa, devido às altas tensões expansivas que se desenvolvem durante a sua formação, enquanto a thaumasite torna a argamassa incoerente e com fraca resistência (MARAVELAKI-KALAITZAKI et al., 2005).

A base da ineficiência e incompatibilidade da utilização de argamassas de base cimentícia com a alvenaria antiga é a natureza das matérias-primas e a respetiva tecnologia de produção, que originam compostos de características muito diferentes dos materiais antigos, alterando o funcionamento mecânico e hídrico da parede (MARAVELAKI-KALAITZAKI et al., 2005).

Por conseguinte, existe atualmente uma procura por argamassas de reparação adequadas e materiais de construção compatíveis com as estruturas originais (MOROPOULOU et al., 2005).

Porém, a escolha de uma argamassa de substituição nem sempre se revela uma tarefa fácil, essencialmente devido às características que cada uma delas permite obter, isto é, se por um lado é necessário uma boa durabilidade em ambientes húmidos, o que implica uma boa resistência à ação da água, por outro, é conhecida a incompatibilidade dos cimentos e de argamassas com alto teor hidráulico com os suportes de alvenaria antiga.

Uma solução passa pela utilização de argamassas à base de cal com adições de pozolanas ou outros materiais semelhantes que apresentem propriedades hidráulicas. Tijolos e telhas britados foram usados em tempos antigos como pozolanas artificiais juntamente com a cal. Atualmente, o metacaulino (Mk) é muitas vezes utilizado como aditivo pozolânico (BARONIO et al., 1997).

O metacaulino é o produto que se forma após o aquecimento da argila caolinítica a temperaturas compreendidas entre os 600-900 °C; este processo denomina-se por Calcinação. Mk com elevada reatividade é obtido a temperaturas de 700-800ºC. O tratamento térmico desorganiza a estrutura cristalina da caulinite, o principal mineral de caulino, criando uma estrutura amorfa caracterizada pela sua capacidade reativa com a cal aérea na presença de água - reação pozolânica (BILLONG et al., 2009).

A nível ambiental, a utilização de argamassas à base de cal aérea com adição de pozolanas traduz-se num menor impacto para o ambiente comparativamente com as argamassas de base cimentícia. Este facto decorre do menor consumo energético associado à produção da cal aérea e da absorção de CO_2 durante o processo de carbonatação (SIDDIQUE et al., 2009). O autor menciona ainda que a adição de metacaulino em argamassas e betões confere um efeito positivo em termos de durabilidade

Segundo Duxson (2009, citado por PACHECO-TORGAL et al., 2011) a produção destes compostos gera menos 80 % de CO_2 que o cimento Portland. Ainda segundo esta temática, Weil (2009 citado por PACHECO-TORGAL et al., 2011) indicam que o potencial de contribuição deste produto

para o aquecimento global combinado com o betão é cerca de 70% inferior ao do betão de cimento Portland.

As temperaturas mais reduzidas a que se processa a calcinação do carbonato de cálcio (com menos de 5% de impurezas) utilizado para a produção de cal aérea (óxido de cálcio) comparativamente às necessárias para a produção da mesma quantidade de clínquer de cimento, geram menor dispêndio de CO_2 tanto no processo de aquecimento, como na sua libertação como subproduto da reação da calcinação.

O curto período de serviço de alguns rebocos de cal aérea sem aditivos resulta do facto do carbonato de cálcio, que é o produto da carbonatação da cal, decompor-se facilmente na presença dos gases ácidos da atmosfera poluída circundante. As análises químicas realizadas a rebocos de diversos edifícios históricos, revelam que aqueles que melhor se preservaram até aos dias de hoje, contêm produtos formados pela reação de cais aéreas com pozolanas ou outros aditivos com propriedades hidráulicas (CERNY et al.,2006).

À medida que a relação metacaulino/cal aérea aumenta, aumenta igualmente a água de amassadura necessária, o módulo de elasticidade estático, assim como as resistências à compressão e tração por flexão, traduzindo-se, porém, numa menor compacidade da argamassa. (AGGELAKOPOULOU et al., 2011).

Aggelakopoulou et al. (2011) refere ainda que a adição de pozolanas muito reativas às argamassas de cal recria as argamassas usadas antigamente (em aquedutos, banhos termais, fundações de edifícios, pontes), exibindo grande durabilidade a condições climatéricas adversas e a ambientes de grande humidade relativa, além de apresentarem valores de resistências mecânicas superiores.

A avaliação de diversas propriedades de rebocos à base de cal aérea indica que a adição do metacaulino por substituição da cal aérea em 20 % de massa permitiu otimizar as características desses rebocos (VEJMELKOVA et al., 2012).

2.3. REAÇÃO DE CARBONATAÇÃO

A carbonatação é o processo pelo qual a cal apagada, hidróxido de cálcio ou portlandite ($Ca(OH)_2$) reage com o dióxido de carbono atmosférico para formar o carbonato de cálcio, significativamente mais forte e menos solúvel, ou calcite ($CaCO_3$). Para ocorrer a carbonatação, a presença de água é essencial, por possibilitar a dissolução e o transporte do CO_2.

Segundo Lawrence (2007) o processo decorre em cinco etapas:

1) Difusão de CO_2 gasoso através dos poros da argamassa;
2) Dissolução do CO_2 nos poros saturados;
3) Dissolução de $Ca(OH)_2$ nos poros saturados;
4) Equilíbrio químico de CO_2 dissolvido nos poros saturados;
5) Precipitação de $CaCO_3$.

A influência da quantidade de água de amassadura utilizada é, por conseguinte, importante, uma vez que irá afetar a estrutura de poros da argamassa endurecida.

Durante a carbonatação há um aumento de volume dos poros com diâmetro da ordem de grandeza dos 0,1 μm, o qual corresponde à transformação da portlandite em calcite.

Ocorre paralelamente um aumento do volume dos poros de diâmetro inferior a 0,03 μm. Este fenómeno deve-se, segundo o autor, às ligações de cristais de calcite com a superfície das partículas de agregado e, em alguns casos, com a superfície dos cristais de portlandite. Este fenômeno pode explicar a presença contínua de portlandite em argamassas que, aparentemente, estão totalmente carbonatadas (LAWRENCE et al., 2007).

Os resultados dos testes conduzidos por Moropoulou (2001) indicam que quanto mais baixa for a temperatura de calcinação, mais reativa será a cal aérea produzida. Segundo esta autora, a sua reatividade está ainda relacionada com as características macroestruturais da pedra calcária a partir da qual é produzida, tais como a textura, a granulometria e a porosidade.

A taxa de carbonatação demonstra ter uma forte interdependência com a humidade relativa e processa-se mais rapidamente na ausência de materiais de pouco ou nenhum cariz hidráulico: uma cal não hidráulica carbonata mais rapidamente que uma qualquer cal hidráulica (EL-TURKI et al., 2009).

A reação de carbonatação depende de vários fatores, tais como a temperatura e a humidade do material poroso, além da concentração de CO_2 da atmosfera circundante. Durante a reação de carbonatação forma-se água, a qual contribui para a humidade da argamassa. (CERNY et al., 2006).

A carbonatação das pastas de cal aérea estudadas por Cerny et al. (2006) não iniciou antes que uma pequena quantidade (entre 2 - 9%) de água perdida durante a exsicação tenha sido reabsorvida.

2.4. REAÇÃO POZOLÂNICA

O material pozolânico contém, na sua constituição, sílica e alumina. Em presença da água estes constituintes reagem com o hidróxido de cálcio produzindo silicatos (C-S-H) e aluminatos de cálcio hidratados (A-S-H). Esta reação é designada por reação pozolânica e desenvolve-se lentamente (FARIA, 2004).

A pozolanicidade é uma questão muito interessante no que concerne aos materiais de construção, segundo a ótica do aumento da durabilidade das argamassas. Esta depende da reação entre o hidróxido de cálcio e materiais com base em alumina e silicatos. Existem diferentes tipos de pozolanas, naturais e artificiais; cada uma destas demonstra atividades pozolânicas que dependem das características dos materiais. Portanto, o estudo desta propriedade, nomeadamente a sua reatividade com o hidróxido de cálcio, torna-se crucial na seleção do tipo e do conteúdo dos materiais pozolânicos (CERNY et al., 2006).

O metacaulino ($Al_2S_2O_7$) forma-se quando o caulino ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) é aquecido até temperaturas de cerca de 600° C por um período de 1- 4 h (CERNY et al., 2006). Esta reação, denominada por desidroxilação, pode ser descrita pela equação:

$$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \longrightarrow Al_2Si_2O_7 + 2H_2O \qquad \text{(Equação 2.1)}$$

O Mk tem propriedades pozolânicas e reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente (cerca de 20° C), formando silicatos de cálcio e aluminatos hidratados. A alta concentração de iões OH^- na água de mistura, o qual tem um valor de pH de 12,45 à temperatura de 25°C, coloca na solução iões Ca^{2+}. Os ligantes de silicato e aluminato hidrolisam simultaneamente, formando-se assim iões simples de acordo com as equações químicas:

$$Si–O–Si + 8\ OH^- \longrightarrow 2[SiO(OH)_3]^- + H_2O \qquad \text{(Equação 2.2)}$$

$$Si–O–Al + 7\ OH^- \longrightarrow [SiO(OH)_3]^- + [Al(OH)_4]^- \qquad \text{(Equação 2.3)}$$

Quando os iões simples de silicato e aluminato estão em contato com iões Ca^{2+}, formam-se géis C-S-H e $C_4\ AH_{13}$. A reação de metacaulino com o hidróxido de cálcio pode resultar igualmente na formação de $C_3\ AH_6$ (aluminato tricálcico hidratado) e $C_2\ ASH_8$ (gehlenita hidratada). Os produtos da reação pozolânica têm igualmente carácter poroso.

Uma parte do hidróxido de cálcio reage com a pozolana; uma outra parte é carbonatada, formando carbonato de cálcio, como traduz a equação seguinte:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad \text{(Equação 2.4)}$$

As equações (2) e (4) são competitivas pois ocorrem em paralelo. A quantidade de compostos resultantes depende da constituição e da finura do metacaulino, da quantidade de água de mistura na argamassa, da concentração de dióxido de carbono no ar, da humidade relativa do ar e da porosidade da argamassa (CERNY et al., 2006).

Cultrone (2005) estudou a evolução de algumas características de argamassas à base de cal aérea com e sem adições pozolânicas, expostas a um ambiente com alto teor em CO_2. Apesar de ter detetado a formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), comprovando assim a ocorrência da reação pozolânica, a verdade é que a quantidade destes produtos que se desenvolveu não foi suficiente para a sua deteção através do DRX. De facto, a deteção destes compostos foi possível só através de análises específicas FESEM-INCA - Field Emission Scanning Electron Microscope. A explicação para este fenómeno, reside na ocorrência de uma rápida carbonatação (estimulada pela elevada

concentração de CO_2), a qual pode destruir a microestrutura dos minerais que se formam após a reação pozolânica. Este fenómeno evidência o carácter competitivo das reações de carbonatação e pozolânica.

Moropoulou (2004), realizou um estudo que visou avaliar o potencial de algumas pozolanas naturais e artificiais, entre as quais o metacaulino, aditivadas a argamassas de cal aérea. A autora indica que são várias as características físico-químicas que influenciam a reatividade de uma pozolana, tais como: o teor em compostos vítreos, o teor total em sílica ativa, a distribuição granulométrica e a superfície específica.

A autora acrescenta ainda que as argamassas com um traço ponderal cal aérea: metacaulino (L:Mk) de 1:2, em comparação com argamassas com traço 1:0,5 e 1:1, foram aquelas que exibiram a maior taxa de consumo de $Ca(OH)_2$, devido à reação pozolânica em condições de cura húmida (HR = 98%, T = 25°C).

2.5. POZOLANAS: O METACAULINO

Uma pozolana é definida segundo a ASTM C125 como ‘‘*um material silicioso e aluminoso que só por si possui pouco ou nenhum valor cimentício, mas que quando dividida em partículas finas e na presença de humidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio a uma temperatura normal formando assim compostos que possuem propriedades cimentícias* " (DONATELLO et al., 2010).

Uma outra definição dada por Mehta (1983), indica que as pozolanas são materiais conhecidos por serem ricos em sílica e alumina em forma amorfa, podendo ser naturais ou artificiais, usadas na otimização da durabilidade das argamassas e do betão. Contribuem para criação de produtos de construção mais sustentáveis substituindo parcialmente ligantes minerais, melhorando o seu desempenho a nível de durabilidade, aplicabilidade e consumo energético.

As características das pozolanas fundamentais para a sua utilização como aditivo são a sua capacidade de reação com a cal aérea a temperaturas ambientes e de formar, após a referida reação, produtos insolúveis com propriedades ligantes (BARONIO et al., 1997).

A nível nacional, as pozolanas naturais são praticamente inexistentes. Esta situação pode ser compensada pelo recurso a pozolanas artificiais, tais como: cinzas volantes, sílica de fumo, metacaulino entre outros (MOROPOULOU et al., 2004).

Fortes-Revilla (2006) realça o carácter amorfo do metacaulino, considerando porém que a elevada superfície específica aliada ao elevado teor em óxidos ácidos (Al_2O_3 + SiO_2> 90%) são a razão pela qual este reage de forma rápida formando compostos de portlandite.

Alguns autores estudaram já os benefícios da combinação do metacaulino com o betão, Kostuc (1993), a título de exemplo, relatou que a substituição de 10-20% da massa do ligante aumenta

os valores de resistência à compressão a idades recentes (7 a 90 dias de cura) quando comparado com o betão convencional.

2.5.1. Vantagens da adição do metacaulino a argamassas de cal aérea

Vários autores investigaram até à data os benefícios que a adição de pozolanas confere às argamassas de cal aérea.

Segundo Pera (1998), o metacaulino melhora a trabalhabilidade, o arranjo microestrutural, as resistências mecânicas das argamassas, e a durabilidade.

As propriedades mecânicas de todos os rebocos de cal aérea + pozolana estudados por Cerny et al. (2006) foram significativamente melhoradas em comparação com as argamassas só de cal aérea. O efeito positivo das misturas pozolânicas analisadas foi observado não só aos 28 dias de teste. Os primeiros resultados dos ensaios a longo prazo mostraram que, no momento em que os efeitos negativos do envelhecimento sobre as argamassas de cal começaram a aparecer e os seus valores de resistência começaram a diminuir, verificou-se ainda um aumento das resistências mecânicas dos rebocos de cal aérea + pozolana, de tal modo que, após 6 meses, eventualmente mesmo 12, esses valores eram várias vezes mais elevados que aos 28 dias.

Num outro estudo, Vejmelkova et al. (2012) identificam o tipo de cal como o fator substancial de afetação dos parâmetros mecânicos, hídricos e de durabilidade das argamassas. Os melhores resultados obtidos verificaram-se para as argamassas de cal aérea + Mk produzidas usando uma cal hidratada de alta pureza (98,0% de CaO + MgO); os piores corresponderam às argamassas com o teor mais baixo de pureza da cal (93,8% de CaO + MgO). As principais diferenças foram observadas a nível da resistência aos ciclos de gelo/degelo, e resistências mecânicas. As propriedades hídricas e térmicas de todos os rebocos de cal aérea + Mk mantiveram-se idênticas entre argamassas. A autora concluiu que as impurezas apresentadas nas cais aéreas, isto é, os compostos presentes nestas, além do óxido de cálcio e magnésio, têm um efeito negativo sobre as propriedades referidas anteriormente.

Fortes-Revilla et al. (2006) referem que argamassas de cal aérea hidratada são utilizadas para a proteção de substratos mais degradados desde a antiguidade, caracterizando-se como materiais muito permeáveis e compatíveis com alvenaria de pedra essencialmente devido ao seu baixo módulo de elasticidade. Por outro lado, os autores referem que se trata de um material muito poroso, caracterizado por ter baixas resistências mecânicas e durabilidade (baixa resistência aos ciclos gelo-degelo). Uma solução para melhorar estas propriedades é, segundo estes investigadores, a substituição parcial da cal hidratada por aditivos pozolânicos ou argilas.

2.6. INFLUÊNCIA DO METACAULINO SOBRE AS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS

Do ponto de vista da otimização das práticas de reparação de edifícios históricos, o resultado mais relevante do trabalho experimental de Cerny et al. (2006) foi o aumento significativo tanto da resistência à compressão como da resistência à tração por flexão, através da adição de pozolanas, entre as quais o metacaulino, a argamassas de cal aérea. Esta melhoria foi obtida sem o uso de cimento, o qual nunca foi usado em edifícios construídos há mais de 100 anos.

Fortes-Revilla et al. (2006) combinaram metacaulino com cal hidratada (L+Mk), concluindo que a utilização desta solução como argamassas de substituição, para reboco de alvenarias antigas entre outras, é muito prometedora, uma vez que as suas resistências mecânicas são muito superiores à das argamassas só com cal aérea mas não o suficiente para que a sua adesão ao suporte seja comprometida. Uma outra vantagem, referem os autores, são as boas resistências mecânicas que estas argamassas apresentam ao fim de 15 dias após amassadura.

No que concerne a evolução das resistências mecânicas a idades recentes, Vejmelkova et al. (2012) indicam que, em provetes de argamassa L+Mk, estas aumentam até aos 28 dias estabilizando a partir desta idade, o que sugere o término da reação pozolânica. A explicação, segundo a autora, prende-se com a finura das partículas de metacaulino, as quais reagem totalmente até esta idade. Por outro lado, no caso dos provetes de argamassa de cal aérea sem adições, o incremento das resistências aumentou até aos 90 dias (idade final da análise); porém, o valor de R_C aos 90 dias foi cerca de 5 vezes inferior àquele obtido nas argamassas L + Mk (1,43/7,03 MPa respetivamente). Por sua vez, a melhoria da resistência à tração por flexão (R_T) dos rebocos de L + Mk, comparativamente aos só de cal aérea foi, aos 90 dias, menos evidente do que as melhorias obtidas na resistência à compressão. Os valores de R_T são 2 a 3 vezes superiores (1,6/0,6 MPa respetivamente).

Moropoulou (2005) indica que argamassas de cal aérea aditivadas com pozolanas tendem a ser misturas que apresentam uma baixa relação entre resistência à compressão e resistência à flexão (R_C/ R_T). O baixo valor deste rácio indicia um comportamento pouco frágil da argamassa, o que é favorável.

A medição de uma larga gama de propriedades dos rebocos preparados e apresentados por Vejmelkova et al. (2012), revelam que a substituição de 20% da massa de cal aérea por metacaulino otimiza os resultados, nomeadamente no aumento significativo das resistências mecânicas e no melhoramento dos parâmetros de fratura mecânica, tornando-se assim um pré-requisito importante para o aumento da durabilidade deste tipo de rebocos comparativamente com os rebocos à base só de cal aérea.

Lanas (2006) moldou provetes de argamassas de cal aérea (CL90) e cal hidráulica de forma a estudar o seu comportamento mecânico e durabilidade tendo para o efeito sido sujeitos a uma cura standard de laboratório durante 1 mês (60±10% de HR e 20±5 °C), após o qual, foram sujeitos a

diversas condições de cura. Do seu trabalho é de realçar que a resistência à tração por flexão foi fortemente influenciada pela humidade relativa do meio envolvente; a exposição ao meio ambiente (CO_2) aumenta a resistência à compressão; o desenvolvimento das resistências mecânicas das argamassas de cal aérea é mais demorado quando sujeito a condições de cura laboratoriais. O autor concluiu ainda que o comportamento mecânico e a durabilidade estão intrinsecamente relacionados com a estrutura porosa. Em argamassas à base de cal aérea sem adições, sejam estas expostas ao meio ambiente ou curadas em câmara de CO_2, gera-se um aumento da porosidade com o tempo, causando uma diminuição das resistências e a um aumento da suscetibilidade à degradação. (LANAS et al., 2006).

Aggelakopoulou et al. (2011) estudou argamassas de Cal aérea + Mk com traço ponderal Mk/L ≤ 1 (1:1; 1:2; 1:5; 1:11). Os provetes foram sujeitos a condição de cura standard (20±2 ºC e 65±5% de HR). As resistências mecânicas foram ensaiadas aos 28, 90, 180 e 365 dias segundo a norma EN 1015-11, tendo atingido os seus valores máximos entre 1-3 meses iniciais e posteriormente diminuído até aos 12 meses, altura em que estabilizaram. Esta perda de resistência mecânica pode ser ligada com o aparecimento de microfissuras nos provetes devido a fenómenos de retração, sendo mais notório no caso dos provetes com maior proporção de Mk/L.

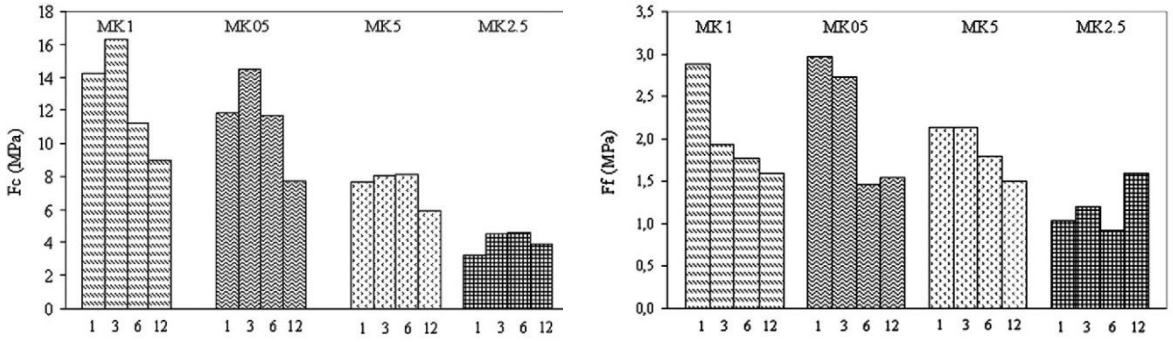

Figura 2.1 - Evolução de R_C e R_T dos 28-365 dias de provetes de argamassas com diferentes traços ponderais (AGGELAKOPOULOU et al., 2011)

O fenómeno é também referenciado por Manita (2011), o qual indica que misturas produzidas com um elevado teor em pozolana, traduzido num incremento de ligante na mistura melhora a resistência à compressão, mas também conduz ao desenvolvimento de fendas.

Faria (2004), moldou provetes de argamassa com adição de pozolanas de Alvarães, cozidos a 600 ºC (kao 600) e 800ºC (kao 800) durante 3,5 horas (i.e., kao600 D) e 30 minutos (i.e., kao600" D). A investigadora formulou argamassas com 3 traços volumétricos distintos fazendo variar as quantidades de pozolana e areia de rio das misturas (1:0,5:3; 1:1:4; 1:1,5:5). Após a desmoldagem, os provetes (40x40x160 mm^3) foram expostos a 2 curas diferentes: seca (D) - 23 ± 3ºC e 50 ± 5% HR- e húmida (mesma temperatura mas em ambiente saturado). Os ensaios decorreram aos 60, 90 e 180 dias, tendo a esta ultima idade sido apenas realizados ensaios de resistência à compressão. Os provetes que apresentaram valores superiores em média foram os com traço volumétrico (1:1:4) ou traço ponderal

kao/L de 1: 0,8. Sendo este o traço que apresenta uma proporção entre estes 2 ligantes mais próxima do rácio utilizado por Aggelakopoulou et al. (2011) e para o qual obteve valores de resistência mais elevados. Os valores obtidos estão expressos na figura 2.2.

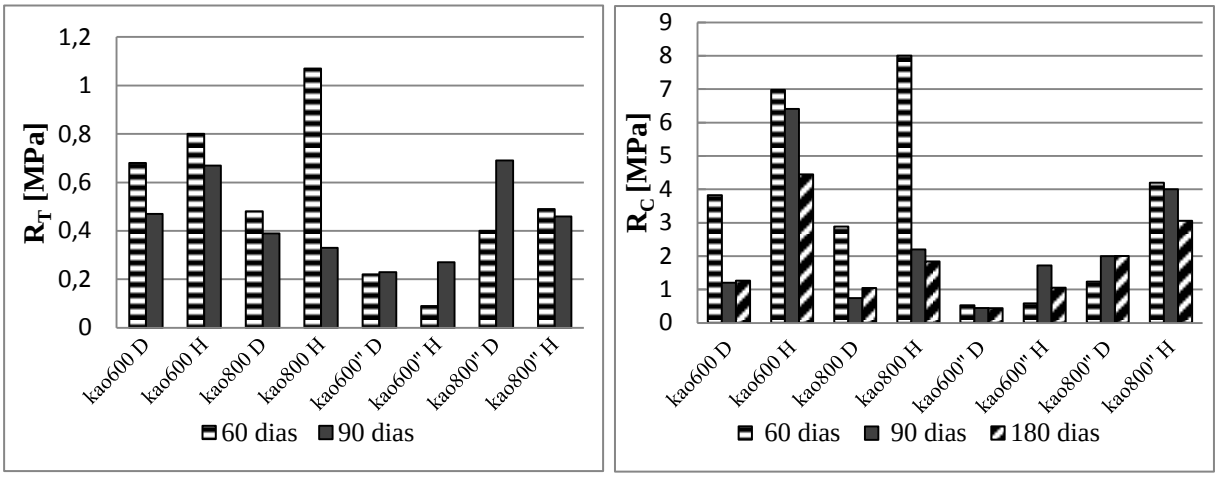

Figura 2.2 - Valores de resistência à flexão e compressão de argamassas com adição de metacaulinos obtidos por Faria (2004) a 3 idades distintas.

A análise dos resultados indica que os valores máximos foram, para a grande maioria dos provetes, obtidos a 60 dias, tanto para provetes expostos a cura húmida como seca. O estabelecimento de uma comparação qualitativa com Aggelakopoulou et al. (2011) torna-se assim difícil uma vez que este não procedeu a ensaios de determinação das resistências a 60 dias, porém os resultados obtidos por Faria (2004) sugerem que os valores máximos absolutos são atingidos nessa idade tanto a nível de resistências à flexão como à compressão, sendo o decréscimo de resistências após os 60 dias mais acentuado no caso das argamassas com metacaulinos cozidos durante 3,5 horas. Além deste dado, é importante reter que os valores máximos atingidos pelos provetes expostos a cura húmida foram para todas as idades estudadas superiores aos expostos a cura seca.

Velosa (2007), no estudo sobre "*Argamassas Novas de Cal com Adições Pozolânicas*" produziu e ensaiou argamassas de cal aérea de traço volumétrico 1:3 (Ligante:Agregado) com substituição parcial da massa do ligante por metacaulino de Alvarães nas percentagens de 10% e 20 % para ambos. O condicionamento das argamassas seguiu o estipulado na norma EN 1015-11 (CEN, 1999) segundo a qual os provetes (40 x 40 x 160 mm^3), foram moldados nas condições de 20ºC ± 2ºC de temperatura e 95% ± 5% de HR, em moldes normalizados e posteriormente mantidos a uma temperatura de 20ºC ± 2ºC e HR de 65% ± 5%.

As denominações CMCA e CMCI exprimem respetivamente argamassas de cal aérea com metacaulino de Alvarães e Industrial, 10 e 20 indicam a quantidade de massa de ligante substituída por metacaulino. Os valores de resistências mecânicas obtidos por Velosa (2007) são apresentados na figura 2.3.

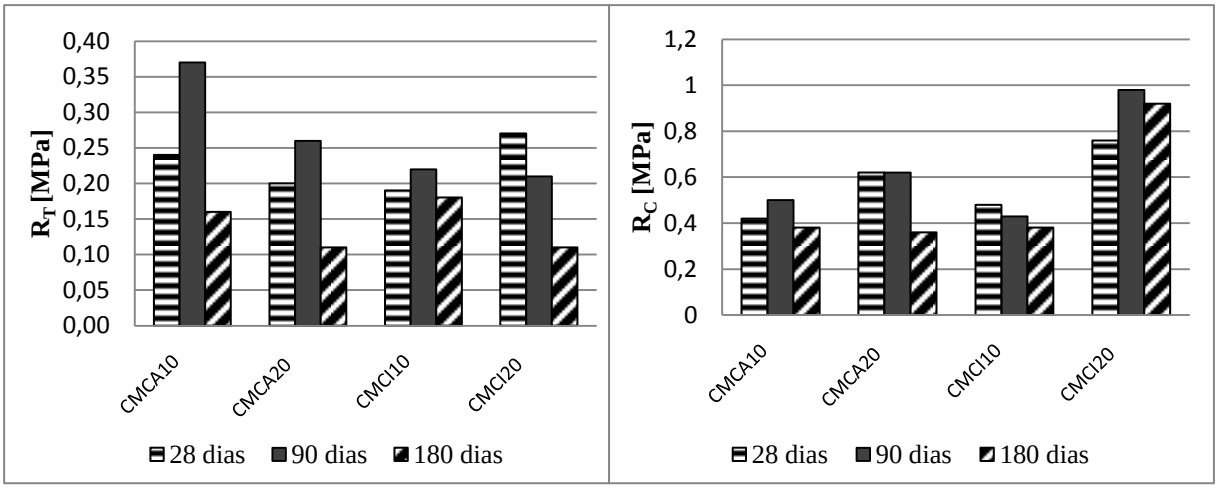

Figura 2.3 - Valores de resistência à flexão e compressão de argamassas com adição de metacaulino obtidos por Velosa (2007) a 3 idades distintas

No sentido de traçar um paralelismo das características mecânicas dos provetes de cal aérea com adição de metacaulino de Alvarães realizados por Velosa (2007) com as dos provetes de cal + metacaulino de Alvarães obtidos por Faria (2004) importa ressalvar que a substituição de 10% e 20% de massa de ligante por Mk feita por Velosa (2007) corresponde a um traço ponderal (L:Mk) de 1:0,12 e 1:0,24 respetivamente. O teor em Mk dos provetes de Velosa (2007) é 2,5 a 5 vezes inferior ao teor em caulino dos provetes realizados por Faria (2004). Este facto justifica os valores de 1,5 a 2 vezes superiores (em alguns casos) registados por Faria (2004) para a resistência à flexão aos 90 dias (sendo esta a única idade comparável para os valores de resistência à flexão) e de 3 a 4 vezes superiores de resistência à compressão aos 90 e 180 dias.

A análise da evolução das resistências à flexão denota uma tendência do aumento dos valores dos 28 para os 90 dias, enquanto as resistências à compressão demonstram uma ligeira variação para as mesmas idades de ensaio. A autora conclui assim que "*Não se verificou qualquer relação entre a adição de diferentes quantidades de metacaulino e a variação da resistência à flexão*. […] *A adição de maior quantidade de metacaulino parece ter tido um ligeiro efeito no aumento da resistência à compressão".*

Seria importante e tornaria mais fidedigna a comparação dos valores obtidos por cada investigadora se fossem conhecidos os valores das resistências mecânicas a 60 dias das argamassas de Velosa (2007) e a 28 dias de Faria (2004).

A questão da boa capacidade de aderência de argamassas de cal aérea (CL90) aditivadas com Mk ao suporte é abordada também por Velosa et al. (2009). Os investigadores compararam este tipo de argamassas com argamassas de cimento (traço volumétrico -1:3- proporção L: Mk: S[1] de 1:0,5:2,5- expostos a condição de cura standard - 65±5% HR e 20±2 °C - e ensaiados a 28 e 90 dias), concluindo que as resistências mecânicas de todas as argamassas de cal + Mk ensaiadas eram inferiores às das do

[1] S - Areia

cimento, facto que relacionado com a boa compatibilidade química tornam-nas as argamassas mais adequadas para trabalhos de conservação de edifícios.

2.7. INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO ÁGUA / LIGANTE

Segundo Billong (2009), a percentagem de água absorvida por argamassas de cal aérea com adição de metacaulino não é influenciada pela percentagem de cal presente na mistura, dependendo principalmente da razão água-ligante e areia-ligante, como demonstra a figura 2.4.

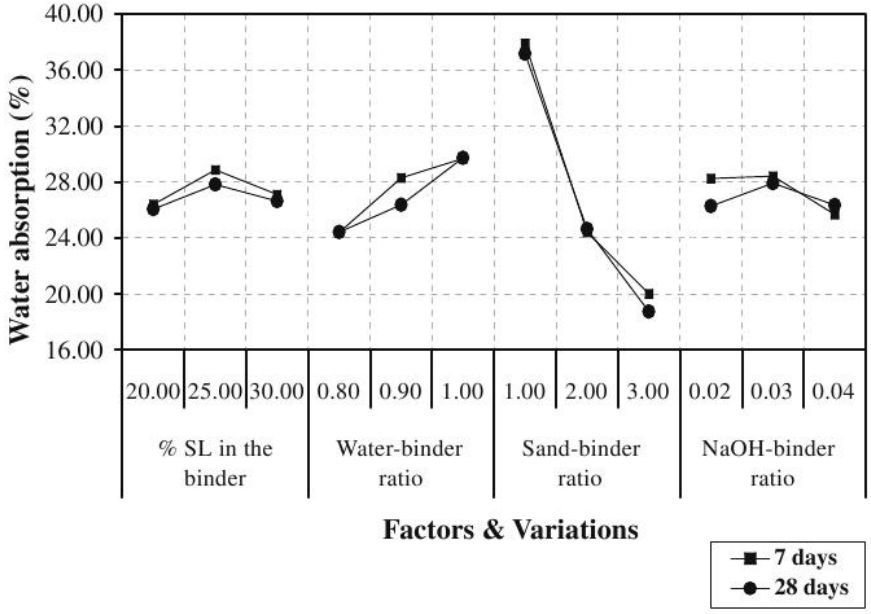

Figura 2.4 – Efeito dos parâmetros estudados por Billong et al. (2009) sobre a absorção de água.

Os processos de amassadura e endurecimento de argamassas de cal aérea com adição de pozolanas são bastante influenciados pela quantidade de água de amassadura introduzida na mistura, bem como pela relação Água/Ligante. No decorrer destes processos ocorrem vários fenómenos físico-químicos que alteram a microestrutura dos provetes (TZIOTZIOU et al., 2011).

Os autores referem que as reações que ocorrem durante o processo de endurecimento das argamassas originam a formação de diversas fases de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (C-S-H) no interior do espaço poroso do provete, modificando assim entre as diferentes idades dos ensaios características tais como a porosidade aberta, distribuição e tamanho dos poros, bem como a área de superfície específica.

Este facto evidência a existência de uma relação direta entre as ocorrências das reações de hidratação e a evolução das características do espaço poroso, e que estes são responsáveis pelo aumento gradual das resistências dos provetes de argamassa (TZIOTZIOU et al., 2011).

2.8. ABSORÇÃO CAPILAR

A absorção capilar por sucção funciona como um indicador da resistência dos rebocos às intempéries (STEFANIDOU et al., 2005).

Rato (2006) indica que a absorção inicial da água é consequência da ação da capilaridade, quer isoladamente, quer em conjunto com outras ações como a pressão exercida pelo vento em situações de chuva. Após a absorção de água inicial, a transferência de massa depende da migração simultânea das fases de vapor e líquida pelo que o transporte de humidade está associado à difusividade e à permeabilidade específicas do material.

O comportamento de uma argamassa à ação da capilaridade depende essencialmente das características da sua estrutura porosa, i.e. da quantidade, dimensão e conectividade dos poros. Deste modo, o tipo de ligante ou a natureza da areia não têm uma influência direta, como sucede com o comportamento mecânico (GARBOCZI, 1995, citado por RATO, 2006).

A quantidade de poros diminui ao longo do tempo, exceto quando ocorrem alterações secundárias, tais como: fenômenos de retração e processos químicos e mecânicos acionados pelo meio ambiente. Os poros capilares representam a maior parte da porosidade das argamassas, desempenhando um papel importante na definição da permeabilidade do material. (STEFANIDOU, 2010).

A temática da absorção capilar ganha especial importância quando analisamos o processo de carbonatação em suportes de alvenaria antiga. Devido à considerável irregularidade das superfícies das alvenarias, muito frequentemente os rebocos são aplicados com grande espessura, causando uma remoção lenta da água dos poros do material, particularmente no caso de alvenaria antiga com baixa capacidade de absorção. A difusão do CO_2 na água é cerca de 10 vezes mais lenta do que no ar, motivo este que torna o processo de carbonatação da cal mais moroso, traduzindo-se num retardamento do aumento dos valores de resistência mecânica. (CERNY et al., 2006).

Um valor elevado de higroscopicidade numa argamassa de cal aérea + Mk pode ser considerado como um fator ambíguo. Para aplicação em interior, esta característica é claramente positiva, uma vez que ajuda a regular a quantidade de vapor de água presente no ar interior. Por outro lado, para aplicação no exterior, uma maior higroscopicidade pode conduzir à acumulação de água no sistema poroso, em particular no período de inverno, que, combinada com à ação dos ciclos gelo-degelo, terá efeitos negativos a nível de conservação sobre o paramento onde é aplicado. No entanto, a maior quantidade de poros abertos e a maior higroscopicidade associada pode contribuir para a remoção de água a partir do material de construção subjacente. Assim, a aplicação deste tipo de argamassa deve ser feito consoante o tipo de características que se pretende potenciar. (CERNY et al., 2006).

Vejmelkova (2012) indica que a adição de metacaulino conduz a uma redução do fluxo de água que percorre o material, concluindo que o coeficiente de absorção capilar [$kg.m^{-2}.seg^{-0,5}$] dos rebocos à base de cal aérea + Mk é cerca de 20% menor que o dos rebocos só com cal aérea.

2.9. POROSIDADE ABERTA

A formação dos poros numa pasta de cal aérea resulta da evaporação da água utilizada na amassadura e da deposição progressiva dos cristais de carbonato de cálcio durante a reação de carbonatação. (RATO, 2006)

A monitorização simultânea do processo de hidratação e evolução da estrutura dos poros em argamassas frescas é uma questão chave para a avaliação do seu desempenho e otimização da distribuição dos constituintes, bem como dos parâmetros de cura (TZIOTZIOU et al., 2011).

Stefanidou (2010), no seu trabalho desenvolvido sobre os métodos de medição da porosidade em argamassas de cal aérea, refere que a razão pela qual a porosidade é um dos parâmetros físicos mais ensaiados em estudos sobre o desempenho deste tipo de argamassas prende-se com a sua influência sobre as propriedades mais relevantes para essa caracterização, tais como as resistências mecânicas e a durabilidade das argamassas.

No mesmo trabalho, a autora indica que a estrutura de poros ocupa um volume considerável das argamassas de cal aérea, sendo este influenciado por diversos parâmetros, os quais podem depender tanto de características tecnológicas da argamassa (tipo de ligantes utilizados, a relação ligante / agregado, o tipo e tamanho de agregados, método de compactação antes de aplicação), como da influência do meio ambiente.

Num estudo precedente, Stefanidou et al. (2005) reforça que uma boa compactação da argamassa em estado fresco é vantajosa para reduzir a penetração de água, aumentando consequentemente a resistência dos rebocos de cal aérea à ação da chuva.

Stefanidou (2005) refere igualmente que os valores mais elevados das resistências mecânicas são obtidos para as argamassas de cal aérea com teores Ligante:Agregado (1:1,5, 1:2,5 e 1:3), contendo grãos de areia de 0-4 mm. Agregados de maiores dimensões contribuem positivamente para a estabilidade volumétrica de argamassas de cal quando a compactação é feita de forma adequada reduzindo assim os poros capilares. Este fenómeno tem um impacto positivo sobre a resistência a longo prazo, o que explica a razão, pela qual nos velhos tempos, pedreiros usavam areão para a construção de estruturas de alvenaria em altura.

Quando são utilizados agregados grosseiros, torna-se necessária uma forte compactação da argamassa, de forma a reduzir os espaços vazios e aumentar a ligação da pasta de cal com os seixos. Esta técnica é também vantajosa tendo em vista a redução da penetração de água pelo material e, consequentemente, aumentar a resistência das argamassas contra as intempéries (STEFANIDOU et al., 2005).

No trabalho desenvolvido por Fortes-Revilla (2006), o qual visou determinar o efeito de fatores como a dosagem dos constituintes e condições de cura sobre alguns parâmetros físicos, tais como a porosidade e as resistências mecânicas de argamassas de cal aérea e metacaulino, o investigador indica ser particularmente surpreendente que nem o tempo de cura nem a carbonatação ao ar livre (em provetes ensaiados a 30 dias) tem um efeito significativo sobre a composição ou a porosidade das argamassas estudadas, tendo porém um efeito moderado sobre as resistências mecânicas.

Cerny et al. (2006) numa análise realizada sob provetes de dimensões normalizadas (40x40x160 mm^3) de cal aérea com traço ponderal (L: Ag) de 1:3 e de cal aérea com metacaulino Metastat 501 (com traço ponderal L:Mk:Ag de 1:1:3) obtiveram aos 28 dias de ensaio valores de Porosidade aberta respetivamente de 34,2% e 45,3%.

Lanas et al. (2006) obtiveram aos 28 dias com provetes de cal aérea (traço volumétrico 1:1) normalizados (40x40x160 mm^3) em condições de cura standard (HR: 60±10% e T:20 ±5 °C) um valor de 34,3% de Pab.

2.10. SECAGEM

Os poros capilares (abertos) com diâmetro que varia entre 0,1 a 100 µm formam-se na matriz do ligante e nas zonas de transição do material durante a fase de hidratação ou de cura devido à remoção de água durante o endurecimento (STEFANIDOU, 2010).

Segundo Rato (2006) a analise dos mecanismos que conduzem ao endurecimento do material, sugere que a quantidade de água evaporável é bastante superior nas argamassas com ligantes aéreos, dando origem a maior retração por secagem e consequentemente à formação de fissuras na matriz da argamassa.

Por outro lado, a cal aérea tem maior superfície específica do que o cimento corrente (RATO, 2006), o que provoca a necessidade de maior quantidade de água de amassadura. Este facto, associado à observação anterior, justifica a maior retração de secagem que se verifica numa pasta de cal comparativamente a uma pasta de cimento.

De facto, não só a cal aérea requer maior quantidade de água de amassadura, como toda a água utilizada vai evaporar com o endurecimento, dando lugar a volume poroso.

Note-se que os materiais com areias mais finas - e, portanto, com maior superfície específica - necessitam de maior quantidade de água de amassadura. Deste modo, quanto mais fina for a areia empregue na argamassas, maior será a retração por secagem das argamassas.

O trabalho desenvolvido por Rato (2006) revelou existirem diferenças significativas entre os materiais com ligantes aéreos e os materiais com ligantes hidráulicos. Estas diferenças parecem dever-se à formação de fissuras originadas pela retração que ocorre durante a secagem, sendo característica

das argamassas com ligantes aéreos. Este tipo de materiais terá, portanto, um tipo de microestrutura que os distingue das argamassas à base de ligantes hidráulicos, nomeadamente pela existência de poros do tipo fenda que influenciam claramente o comportamento mecânico e o processo de absorção e água por capilaridade.

2.11. EFEITO DA CONDIÇÃO DE CURA

Quando a cal hidratada na forma de pó é misturada com água, formam-se cristais hidratados que posteriormente vão produzir placas espessas de cal carbonatada. A estrutura desta matriz é pouco condensada, formando-se várias descontinuidades. Nas fases iniciais, as pastas de cal hidratada com cura em câmaras de alta humidade são mais friáveis que aquelas com cura seca. Porém, com o envelhecimento, as argamassas expostas a cura seca apresentam maior fendilhação que as de cura húmida (STEFANIDOU et al., 2005).

A carbonatação de argamassas de cal aérea, com e sem aditivos (cinzas vulcânicas), processada sob condições ambientais naturais, além de ser consideravelmente mais lenta, não consegue atingir a mesmo taxa de carbonatação que é conseguida através de carbonatação forçada. A importância da concentração do dióxido de carbono na velocidade da reação portlandite→calcite foi demonstrada por Cultrone (2005) sob valores de humidade relativa (50%) e temperatura (25ºC) programados especificamente para a sua pesquisa.

No que respeita a influência de condições de cura diferenciadas das argamassas, os aspetos de maior relevo detetados por Faria et al. (2011) foram: a dificuldade inicial do endurecimento de argamassas à base de cal aérea quando expostas a níveis elevados de CO_2 e o aumento da taxa de carbonatação e das características mecânicas, após o endurecimento inicial nas argamassas expostas a cura com alto teor de CO_2. Assim, para o intervalo de tempo estudado, a cura com 65 % de HR foi a mais apropriada para argamassas de cal aérea sem aditivos.

No caso das argamassas com cal aérea + metacaulino, os resultados obtidos por Faria et al. (2011), embora não reproduzíveis in situ, demonstraram que a condição de cura com alto teor em CO_2 geralmente potencia as características destas argamassas por ação da reação de carbonatação. Dentro do tipo de curas reproduzíveis, aquela que demonstrou melhores resultados foi a cura húmida (95 % HR), nomeadamente pelo prolongamento da reação pozolânica e permitir o transporte de CO_2.

2.12. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

Os rebocos à base de cal aérea tradicionais apresentam propriedades térmicas que se adequam aos requisitos dos edifícios históricos. Porém, importa mencionar que a otimização do

desempenho a nível de resistências mecânicas, derivado da adição de pozolanas às argamassas, não deve piorar o comportamento térmico do revestimento.

De facto, a inclusão deste aditivo conduz a uma redução da condutibilidade térmica das argamassas de cal aérea+Mk. Esta melhoria é aparentemente consequência do facto do metacaulino ser um material poroso, cabendo à parte que não participa na reação pozolânica responsabilidade pelo aumento da porosidade da argamassa, a qual poderá igualmente ser aumentada devido ao carácter poroso dos produtos da reação pozolânicos, principalmente os compostos C-S-H (CERNY et al., 2006).

A condutibilidade térmica de todos os rebocos analisados por Vejmelkova et al. (2012) aumentou muito significativamente com o aumento da humidade relativa, tal como espectável. A autora analisou a evolução de rebocos formulados com argamassas à base de cal aérea CL90 com e sem adição de metacaulino. As diferenças entre as condutibilidades térmicas dos rebocos de cal aérea + Mk não foram muito elevadas para toda a gama de teores de humidade analisada, cifrando-se entre 5-10%, para um valor máximo de 25%. A condutibilidade térmica do reboco de cal aérea foi inferior aos de cal aérea + Mk em toda a gama como comprova a figura 2.5.

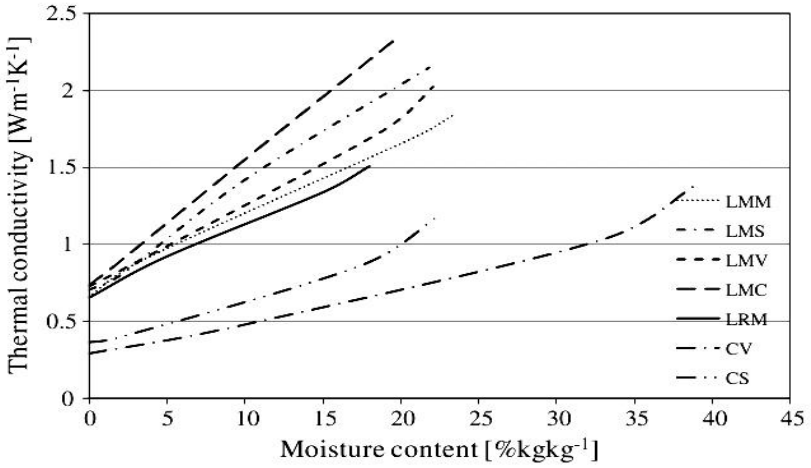

Figura 2.5 – Variação da condutibilidade térmica dos rebocos com o teor de humidade (VEJMELKOVA, et al., 2012).

Cerny et al. (2006) no trabalho mencionado anteriormente, obteve aos 28 dias valores de condutibilidade térmica de 0,73 [W/m.K] para as argamassas de cal aérea e de 0,40 [W/m.K] para as argamassas de cal aérea com metacaulino Metastat.

2.13. TERMOGRAVIMETRIA

O cruzamento das análises térmicas com os resultados dos processos de Difração e Fluorescência de raios X possibilita a determinação dos componentes das argamassas e quantificá-los, através das reações químicas que vão ocorrendo com o aumento de temperatura. Contudo, devido a diferentes formas de cristalização e tamanho, o comportamento dos minerais não é uniforme, e as reações podem ocorrer a temperaturas diferentes (VELOSA, 2007).

A termogravimetria é uma técnica que permite aferir, com elevado grau de precisão, as quantidades de $Ca(OH)_2$ e $CaCO_3$ presentes numa amostra de argamassa de cal. A degradação térmica de uma cal não hidráulica é um processo constituído por duas partes distintas. O hidróxido de cálcio perde a sua ligação química com a água entre 350 e 550ºC (desidroxilação); por seu turno, o carbonato de cálcio perde a ligação química com o dióxido de carbono entre 600 - 900ºC – descarboxilação (LAWRENCE et al., 2006).

Moropoulou (1995) precisa que quando as argamassas não se encontram totalmente carbonatadas, os efeitos de desidroxilação da portlandite serão percetíveis num pico na zona dos 400-520°C.

A análise conduzida por Lawrence (2006) permitiu-lhe descobrir que a frente de carbonatação não progride necessariamente através da argamassa de uma forma linear. Uma pequena quantidade de carbonatação ocorre no núcleo da argamassa precedendo a frente de carbonatação, a uma taxa que é suscetível de ser relacionada com a distribuição de tamanho de poro da argamassa.

Mesmo quando o processo de carbonatação termina, aparentemente, as argamassas de cal aérea retém ainda uma quantidade significativa de cal não carbonatada.

A termogravimetria também pode ser utilizada para avaliar e otimizar o tratamento térmico ao qual submeter os caulinos para obtenção de metacaulinos. As análises térmicas realizadas a um metacaulino nacional indicam que o intervalo térmico mais aconselhado para exploração das propriedades pozolânicas do metacaulino está compreendido entre 600ºC e 800ºC (FARIA, 2004).

Cultrone (2005) indica que uma cura em ambiente com alta concentração em CO_2 favorece o processo de carbonatação, tornando-o mais rápido e completo. Através da análise por difração de raios X, este verificou que ao cabo de 8 dias, cerca de 90 % da massa da portlandite tinha-se convertido em calcite. Sob condições normais, a carbonatação desenvolve-se mais lentamente, ao ponto que só se atingem estes valores ao fim de 6 meses. Assim, um ambiente com elevada concentração de dióxido de carbono estimula a reação de carbonatação.

2.14. DIFRAÇÃO POR RAIOS X

A maioria dos materiais sólidos organizam-se segundo uma estrutura cristalina. A técnica da difração por raios X (DRX) assenta na periodicidade tridimensional da estrutura interna dos corpos cristalinos e no facto de o comprimento de onda dos raios X ser da mesma ordem de grandeza das distâncias interatómicas (CHATTERJEE, 2000).

A análise de DRX de amostras finamente pulverizadas permite a identificação das substâncias cristalinas presentes quando a sua concentração não é muito baixa, geralmente acima de 5%. Genericamente, os componentes amorfos, tais como os silicatos solúveis (formados durante o processo de cura de argamassas à base de ligante hidráulico, ou cinzas vulcânicas) e geralmente muito

importantes nas argamassas à base de ligantes hidráulicos, não são identificáveis, podendo mesmo criar problemas na identificação das substâncias cristalinas existentes. É por isso que os resultados do DRX por si só não podem ser usados para determinar a composição das argamassas, mas sim para fornecimento de dados suplementares (MOROPOULOU, 1995).

Sepulcre-Aguilar et al. (2010), revelam que as maiores resistências de argamassas com cal aérea + Mk verificam-se quando ocorrem grandes concentrações de stratlingite e C_4AH_{13} na sua análise química, além de C-S-H, resultando numa contribuição mínima de hidrogarnets para as resistências mecânicas.

Segundo Rojas (2006) este composto produz efeitos nocivos sobre a capacidade aglomerante do metacaulino, conduzindo a um enfraquecimento das resistências mecânicas e consequente afetação do comportamento e durabilidade dos provetes.

Segundo o DRX de argamassas de cal aérea com alto teor de substituição de massa de cal aérea por metacaulino, o pico da stratlingite é tanto mais intenso quanto maior for a massa de cal aérea substituída por metacaulino, tendo tendência a aumentar com o envelhecimento. Em contraste com a evolução da stratlingite e dos aluminatos de cálcio hidratados, verifica-se, tal como expectável, uma diminuição do pico da portlandite na razão inversa do aumento do teor em metacaulino por substituição da massa de cal aérea. De facto, quanto maior for esse teor em metacaulino menor será o período de tempo em que a portlandite será detetável no DRX (GAMEIRO et al., 2012).

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. PLANEAMENTO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

O presente trabalho experimental visa estudar o comportamento de argamassas de cal aérea com substituição crescente de metacaulino em massa através da análise evolutiva das suas características a idades de 28 e 90 dias e sujeitas a condição de cura húmida (95%±5%).

O planeamento do trabalho desenvolvido nesta dissertação baseou-se na campanha experimental realizada no âmbito da dissertação do Engenheiro Nuno Felgueiras (FELGUEIRAS, 2011), que caracterizou argamassas de cal aérea e metacaulino com traços volumétricos 1:3 e mais fracos em ligante. Foi englobado no projeto financiado pela FCT-MEC METACAL, definido por FARIA (2011) e LIMECONTECH, que respectivamente pretendem otimizar argamassas de cal com metacaulino e contribuir para a conservação dos revestimentos históricos.

A maioria dos procedimentos experimentais foram executados no DEC/FCT–UNL[2], com o acompanhamento do Engenheiro Vítor Silva, bolseiro da FCT-UNL e do colega e Engenheiro João Carneiro, cujo trabalho experimental foi realizado paralelamente ao desta dissertação, tendo incidido na caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com substituição parcial de metacaulino sujeitas a condição de cura húmida e standard (CARNEIRO, 2012).

A caracterização Química e Mineralógica e a obtenção das resistências mecânicas aos 90 dias das argamassas de substituição, decorreram no LNEC[3] com o apoio da Doutora Rosário Veiga do Doutor Santos Silva e do Bolseiro André Gameiro, investigadores do projeto FCT-MEC METACAL.

3.1.1. DETALHE DAS ARGAMASSAS E PROVETES

As argamassas foram formuladas aos traços volumétricos 1:3, 1:2 e 1:1.

O objetivo pretendido é promover as reações de carbonatação e pozolânica através do aumento do teor em ligante das argamassas com traços mais fortes em ligante (traços 1:1 e 1:2, comparativamente a 1:3).

Para além do traço volumétrico definiram-se também 3 valores de substituição crescente da massa de cal aérea pelo produto pozolânico artificial – metacaulino. As percentagens de massa substituídas foram respetivamente: 0%, 30% e 50%. Dessa forma, produziram-se 9 tipos de argamassas de cal aérea.

[2] Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

[3] Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Para melhor identificação dos provetes, atribuiu-se uma combinação de letras e números às argamassas que facilmente expressassem a constituição destas, como demonstra o quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Designação das argamassas.

Tipo de Ligante		traço volumétrico		% de metacaulino substituinte da massa de cal aérea	
Lime	**L**	1:1	**1**	0 % de Mk	-
		1:2	**2**	30 % de Mk	**Mk30**
		1:3	**3**	50 % de Mk	**Mk50**

A quantificação do número total de provetes a realizar teve como base de sustentação o número e tipologia dos ensaios pretendidos, bem como as diferentes idades de caracterização.

A caracterização dos provetes no estado endurecido ocorreu para duas idades: 28 e 90 dias. Por limitação do número de moldes disponíveis no momento da realização das amassaduras, foram moldados apenas 9 provetes (3 moldes) por argamassa. Cada molde permite a compactação e moldagem de 3 provetes prismáticos com 40×40×160 mm^3.

Os provetes de cada argamassa foram numerados de 1 a 9. Após a sua numeração, seriaram-se os provetes em lotes de 3 para caracterização a cada uma das idades. No quadro 3.2 apresentam-se os provetes utilizados para a caracterização. Os ensaios são introduzidos segundo ordem cronológica.

Quadro 3.2 – Provetes de cada argamassa utilizados nos ensaios realizados aos 28 e 90 dias.

Ensaios	**Idade**	
	28 dias	90 dias
Módulo de Elasticidade	**1;2;3**	**4;5;6**
Resistências à Tração por Flexão e Resistência à Compressão	**1;2;3**	**4;5;6**
Capilaridade	**1;2;3**	**4;5;6**
Secagem	**1;2;3**	**4;5;6**
Porosidade aberta	**1;2;3**	**4;5;6**
Condutibilidade Térmica*	**1;2**	**-**
Resistência aos Sulfatos[#]	**1;2;3**	**4;5;6**

*Ensaio realizado aos 135 dias das argamassas que estiveram em cura húmida e foram caraterizadas aos 28 dias, a partir do qual permaneceram a 65% de HR.

[#] Ensaio realizado aos 145 dias.

Face ao que foi realizado na campanha experimental de Felgueiras (2011) promoveu-se caracterização de todos os ensaios a cada uma das idades através de um lote de 3 provetes. Assim, realizaram-se os ensaios da absorção de água por capilaridade, de secagem, condutibilidade térmica e resistência aos sulfatos com os meios provetes resultantes dos ensaios de caracterização das resistências mecânicas.

Para a realização do ensaio de porosidade aberta, foram utilizados as bases das metades dos provetes usados na caracterização da resistência à compressão.

Os provetes 7, 8 e 9 de cada argamassa serão ensaiados aos 180 dias, não estando a sua caracterização inserida no âmbito desta dissertação.

3.1.2. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais adotados foram os estipulados para o projeto FCT-MEC METACAL (FARIA, 2011), no seguimento dos trabalhos experimentais precedentes, desenvolvidos por Massena (2011) e Felgueiras (2011) os quais se englobaram no referido projeto, optou-se por manter os mesmos materiais de forma a traçar um paralelismo a nível constitutivo com as argamassas estudados por estes.

Nesse sentido foram adotados os seguintes materiais:

3.1.2.1. **Ligante**

Para a produção das argamassas, foi utilizada uma cal aérea hidratada em pó ***Lusical H100*** – classificada como uma CL90**,** em que CL indica tratar-se de uma cal calcítica (calcium lime), e 90 a percentagem mínima de massa de Óxido de Magnésio mais Óxido de Cálcio presente na cal, os restantes requisitos são expressos no Quadro 3.3.

Sendo um ligante reativo ao CO_2, procurou-se sempre manter o saco aberto o menor tempo possível para evitar fenómenos de carbonatação da cal. Além desta, houve também sempre a precaução de manter o saco em local seco e isento de humidades; pelo que se envolveu em polietileno.

Quadro 3.3 – Requisitos químicos de cal aérea dados por valores característicos.

Tipo de cal calcítica	**Valores dados em fração de massa [%]**				
	CaO+MgO	**MgO**	**CO_2**	**SO_3**	**Cal aérea disponível**
CL 90	≥90	≤5	≤4	≤2	≥80

3.1.2.2. **Pozolana**

A pozolana usada como substituto parcial da cal aérea na execução dos provetes foi um metacaulino comercial **Argical M 1200 S** da Imerys.

A opção pela utilização deste metacaulino de origem francesa, foi estipulada para o projecto, de forma a garantir uma qualidade constante do material entre fornecimentos.

O acondicionamento do metacaulino seguiu o mesmo procedimento descrito para a cal.

Quadro 3.4 – Composição química do metacaulino Argical M1200 S (FERRAZ et al., 2012).

Metacaulino Argical M1200S	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	MnO (%)	MgO + CaO (%)	Na_2O + K_2O (%)	TiO_2 (%)	P_2O_5 (%)	Perda ao rubro (%)
	55,0	39,0	1,8	-	0,6	1,0	1,5	-	0,6

3.1.2.3. **Agregados**

Para que todas as argamassas realizados nesta fase do projeto METACAL (FARIA, 2011) pudessem ser comparadas, sem entrar em conta com a influência das areias, utilizaram-se areias siliciosas secas e bem graduadas da Areipor, empresa certificada segundo a norma ISO 9001.

A terminologia indica a granulometria da areia, sendo: APAS 12 – Areia Grossa ; APAS 20 – Areia Intermédia; APAS 30 – Areia Fina.

As areias são comercializadas em sacos fechados de 40 kg e secas, como demonstra a figura 3.1.

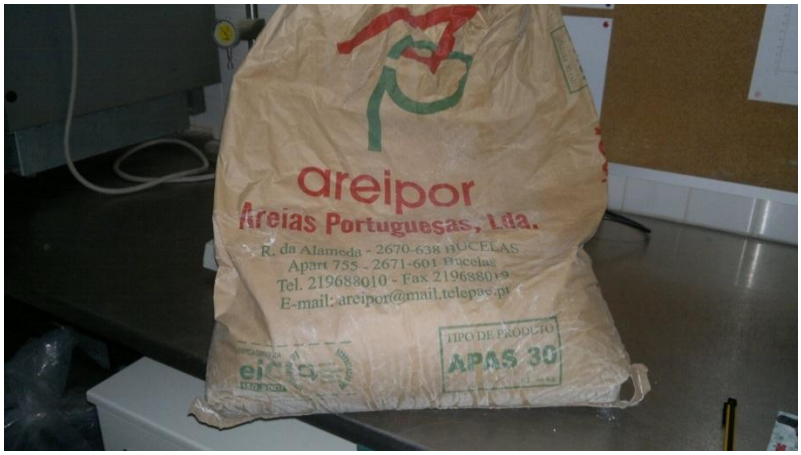

Figura 3.1 – Saco da areia APAS 30.

No LNEC foram previamente efetuados ensaios quanto à baridade, volume de vazios e análise granulométrica das areias, tendo em vista a otimização da mistura. Essa otimização procurou criar uma mistura bem graduada, com um baixo valor de volume de vazios e com uma granulometria bem distribuída, de forma a minorar fenómenos de retração (MARTINS, 2010).

O traço volumétrico otimizado obtido no LNEC para a mistura de areias foi [1:1,5:1,5] respetivamente de APAS 12, APAS 20 e APAS 30.

O mapa de quantidades utilizado para os 3 traços volumétricos das argamassas com base em cal aérea tiveram por base o referido traço da mistura de areias, fazendo variar o volume de ligante à medida do traço que se pretendia. Dessa forma, as proporções volumétricas entre cada um dos agregados e do ligante foram as indicadas no quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Proporções em volume dos constituintes sólidos das argamassas para cada traço volumétrico.

Traço volumétrico					
1:1		1:2		1:3	
1 vol	APAS 12	1 vol.	APAS 12	1 vol	APAS 12
1,5 vol.	APAS 20	1,5 vol.	APAS 20	1,5 vol.	APAS 20
1,5 vol.	APAS 30	1,5 vol.	APAS 30	1,5 vol.	APAS 30
4 vol.	Ligante	**2 vol.**	Ligante	**1,33 vol.**	Ligante

3.1.3. CARACTERIZAÇÃO DA CONDIÇÃO DE CURA

O objetivo desta campanha é estudar a evolução de algumas das características de argamassas de cal aérea e metacaulino expostas a uma condição de cura húmida, com uma percentagem elevada de humidade relativa, 95±5%, e a uma temperatura de 23±3°C.

A câmara de cura húmida possui um tanque retangular com uma altura de água na base. A cerca de 15 cm do topo do tanque colocou-se uma armação inox que sustenta uma malha quadrada rígida sobre a qual se dispuseram os provetes. O tanque é coberto por uma tampa de polietileno não completamente estanque ao ar e encontra-se num compartimento interior localizado abaixo do nível do terreno, cuja porta se encontra vedada e tem abertura condicionada. As condições termo-higrométricas são estáveis e foram registadas em contínuo, os valores de temperatura e humidade relativa foram obtidos através de um sensor posicionado a meia altura do tanque. Os valores destes parâmetros são apresentados no anexo I (valores até aos 28 dias).

3.1.4. ENSAIOS REALIZADOS

No que concerne os ensaios realizados, os quais traduzem a evolução das características das argamassas estudadas neste trabalho, convém distingui-los entre destrutivos e não destrutivos e aqueles que se destinam a caracterização das argamassas no estado fresco e no estado endurecido.

O ensaio que caracteriza as argamassas no estado fresco é o ensaio de consistência por espalhamento (Esp.). Este define uma gama de valores dentro dos quais a argamassa apresenta uma trabalhabilidade boa para ser aplicável em rebocos.

A caracterização de materiais no estado endurecido envolve tanto ensaios destrutivos como não destrutivos. A vantagem deste último tipo prende-se com a possibilidade de reutilização dos mesmos provetes de argamassa para a realização de mais do que uma caracterização.

A calendarização dos ensaios a cada idade teve em linha de conta a reutilização sucessiva dos provetes. Assim seguiu-se a sequência definida, que previa a realização dos ensaios não destrutivos antes dos destrutivos. Esta situação não se verificou propositadamente para o ensaio de Resistência à tração por flexão (R_T), uma vez que para a realização do plano de ensaios, com a limitação produtiva de 3 moldes por argamassa (9 provetes), foi estipulado que os ensaios seguintes seriam realizados sobre as 2 metades dos provetes criadas como consequência deste ensaio destrutivo (da geometria).

A caracterização no estado endurecido pressupôs a realização dos seguintes ensaios, os quais são elencados cronologicamente:

a) Ensaios mecânicos:
   - Módulo de elasticidade dinâmico (E_{din});
   - Resistência à tração por flexão (R_t);
   - Resistência à compressão (R_c).

b) Ensaios físicos e de durabilidade:
   - Absorção de água por capilaridade;
   - Secagem;
   - Porosidade aberta (Pab);
   - Condutibilidade térmica;
   - Resistência à ação dos sulfatos;

c) Ensaios químicos e mineralógicos:
   - Análise por difração de raios-X (DRX);
   - Análise termogravimétrica e por térmica diferencial (TG-ADT);

3.2. REALIZAÇÃO DOS PROVETES E CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

3.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O planeamento decorreu segundo o estipulado previamente no âmbito do projeto FCT-METACAL (FARIA, 2011).

O processo de amassadura decorreu no laboratório de Materiais de Construção do DEC/FCT-UNL[4].

Foram realizadas algumas verificações prévias ao arranque dos trabalhos laboratoriais, segundo o documento guia do projeto FCT-METACAL (FARIA, 2011) e são expressas em seguida:

- Existência de matérias-primas, nomeadamente a secagem das areias;
- Existência de luvas e máscara para pó, cronómetro, sacos de plástico, lápis para marcação de moldes;
- Existência dos utensílios para espalhamento (cone, varão, régua e craveira – ou craveira digital, balde e pano);
- Verificação do aperto dos moldes e da existência (e remoção quando em excesso) da massa descofrante (50% de massa consistente e 50% de óleo de automóvel).
- Colocação do 1º molde na mesa de compactação com o acréscimo dos moldes.

A nível laboratorial a grandeza física usada para a constituição das argamassas é a massa, pelo que foi necessário determinar a baridade de cada um dos materiais de forma a converter os traços volumétricos para traços ponderais e assim obter o valor de massa necessário para a realização de cada argamassa.

[4] Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa

A baridade (Ba) dos materiais tinha sido previamente determinada pelos bolseiros do LNEC, André Gameiro e Sandro Botas, tendo sido posteriormente confirmada na UNL.

Considerando-se a capacidade da cuba e com vista à realização de 9 provetes por amassadura, procedeu-se à dosagem das argamassas. Como referido anteriormente, o mapa de quantidades dos constituintes secos a utilizar para a conceção de cada uma das argamassas foi estipulado através do aumento do traço volumétrico do ligante, mantendo fixo o volume de agregados na mistura. Esta situação criou uma limitação da capacidade da cuba da misturadora mecânica devido ao acréscimo de volume de ligante(s) na mistura das argamassas de traço mais forte, facto que dificultava a homogeneização manual dos componentes secos, além de impossibilitar a amassadura de toda a porção na misturadora. Para corrigir esta deficiência, foi necessário recalcular os volumes de referência para as argamassas de traço 1:2 e 1:1 de forma a serem mantidas as proporções acima referidas entre volume das areias e posteriormente a relação volumétrica para o ligante(s).

No caso da argamassa L1, para a qual foi necessário refazer a amassadura devido à disparidade do valor de espalhamento face à correlação do intervalo de valores indicados pela norma EN 1015-3:1999/2006 (CEN, 2006), houve, além desta, a necessidade ainda de fazer uma nova amassadura, com metade do volume dos constituintes da amassadura, pois a primeira permitiu compactar apenas 8 provetes.

Para identificar as argamassas de substituição, adicionou-se a designação "-2" depois da designação inicial da argamassa, por exemplo: L1_Mk30-**2.**

Quadro 3.6 – Mapa de quantidades dos constituintes utilizados por argamassa.

Argamassa	**Massa (g)**					**Vol. água (ml)**
	APAS 12	**APAS 20**	**APAS 30**	**Mk**	**Cal aérea**	
L3	1129,6	1686,0	1665,6	0,0	386,1	1000
L3-2	1129,6	1686,0	1665,6	0,0	386,1	**950**
L3_Mk30	1129,6	1686,0	1665,6	115,8	270,3	950
L3_Mk30-2	1129,6	1686,0	1665,6	115,8	270,3	**970**
L3_Mk50	1129,6	1686,0	1665,6	193,1	193,1	980
L3_Mk50-2	1129,6	1686,0	1665,6	193,1	193,1	**1000**
L2	1129,6	1686,0	1665,6	0,0	579,2	1000
L2_Mk30	1059,0	1581,0	1561,5	162,9	380,1	1000
L2_Mk50	1059,0	1581,0	1561,5	271,5	271,5	1000
L1	988,4	1475,3	1457,4	0,0	1013,6	1011
L1-2	1099,1	1640,2	1621,0	0,0	1127,3	**1200**
L1_Mk30	988,4	1475,3	1457,4	304,1	709,5	1100
L1_Mk30-2	809,7	1208,3	1194,2	249,1	581,3	**950**
L1_Mk50	988,4	1475,3	1457,4	506,8	506,8	1190

Para a formulação das argamassas de substituição, foram mantidas as dosagens originais dos constituintes sólidos no caso das argamassas de traço volumétrico 1:3 (L3-2, L3_Mk30, L3_Mk50-2) tendo sido feito o ajuste do volume de água de amassadura.

No caso das argamassas L1-2 e L1_Mk30-2 ambas de traço volumétrico 1:1, além do referido ajuste de água introduzida na mistura foram igualmente reformuladas as dosagens (mantendo as proporções entre constituintes) devido à limitação de volume da cuba da misturadora, insuficiente para conter a totalidade da mistura e permitir a amassadura sem que ocorresse perda de massa.

3.2.2. AMASSADURA

Procedeu-se de acordo com o procedimento de amassadura definido previamente no âmbito do projeto FCT-METACAL (FARIA, 2011).

As normas existentes para a preparação de argamassas referem-se principalmente a argamassas de base cimentícia; porém, os procedimentos de execução dos provetes tiveram como base as indicações da norma EN 1015-2/A1 (CEN, 1998/2006) e NP EN 196-1 (IPQ, 2006), com algumas alterações, nomeadamente no que respeita aos tempos de amassadura mecânica e na ordem de introdução dos constituintes na cuba.

Após a determinação da granulometria de cada uma das areias e da determinação das baridades de cada constituinte que compõem as argamassas, procedeu-se às suas pesagens.

A quantidade de massa a pesar foi o produto da multiplicação do valor da baridade (g/cm^3) pelo volume (cm^3) de cada uma das matérias-primas, respeitando o traço volumétrico pretendido. Calculou-se assim a quantidade de material necessário para a preparação das argamassas.

Para o efeito colocou-se sobre a balança, de precisão 0,1 g, um tabuleiro com dimensões suficientes para albergar os componentes sólidos da argamassa e que permitisse a sua homogeneização manual sem que houvesse desperdício de massa. Tarando o peso do tabuleiro, iniciou-se a introdução dos elementos seguindo uma ordem fixa entre as diferentes argamassas, segundo a qual foram pesadas primeiramente as areias por ordem decrescente de granulometria, seguidas da cal aérea e por fim o metacaulino (no caso das argamassas que o deviam conter).

De referir que a deposição de cada constituinte foi feita por compartimentação no tabuleiro de forma a evitar erros quando necessária a remoção de massa para o acerto da quantidade estipulada.

Segue-se como referido acima a homogeneização manual da mistura com uma pá. O passo seguinte foi transferir a massa homogeneizada para a cuba da misturadora mecânica, tendo neste processo, como no anterior, sempre a preocupação de não perder material. Previamente, mediu-se o volume de água pretendido, com o auxílio de uma proveta graduada.

Figura 3.2 – Pesagem dos constituintes secos e homogeneização manual.

De acordo com procedimentos previamente definidos para a produção deste tipo de argamassas colocou-se a misturadora em funcionamento na velocidade lenta durante 150 segundos, nos primeiros segundos de amassadura foi introduzida a água de forma contínua e uniforme. Ao fim dos 2,5 minutos fez-se uma breve paragem do equipamento para que se procedesse à raspagem das paredes e do fundo do molde, bem como da própria pá da misturadora. Para esta finalidade utilizou-se um rapa.

A introdução da água foi feita gradualmente na cuba e misturada mecanicamente com os constituintes secos homogeneizados previamente introduzidos na cuba antes de iniciar a misturadora. Este processo constitui uma alteração fase ao indicado na norma EN 1015-2/A1 (CEN, 1998/2006), a qual referencia o procedimento da mistura de acordo com a norma NP EN 196-1 (IPQ, 2006), segundo a qual a deposição do volume total da água e do ligante deve decorrer antes de ligar a misturadora, adicionando-se os agregados gradualmente nos primeiros 30 segundos após iniciar a mistura. Importa referir ainda que a norma NP EN 196-1 (IPQ, 2006), foi concebida para ensaio a argamassas de cimento.

Por fim, voltou-se a ligar a misturadora na velocidade lenta por mais 30 segundos, de forma a concluir o processo de amassadura.

Figura 3.3 – Transferência dos constituintes secos para a cuba e amassadura mecânica na misturadora.

De referir ainda que se teve sempre a preocupação de lavar todos os utensílios intervenientes na amassadura sempre que se passava de uma amassadura de cal aérea com substituição de massa da cal por metacaulino, para uma sem substituição de massa de cal, de forma a evitar a contaminação destas últimas com metacaulino.

3.2.3. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

Este ensaio caracteriza a argamassa no seu estado fresco, é feito imediatamente após o término da amassadura mecânica. Serve como indicador da trabalhabilidade da argamassa, isto é, afere sobre a sua aplicabilidade em obra, no âmbito deste trabalho, como reboco.

O procedimento baseia-se na norma EN 1015-3:1999/2006. (CEN, 2006), porém a mesa de espalhamento do laboratório da UNL está de acordo com a versão inicial da norma. Dessa forma, foram realizados ensaios comparativos no sentido de criar uma correlação entre os valores efetivamente obtidos na mesa de espalhamento e os de referência da norma. Os valores obtidos na mesa de espalhamento da UNL apresentam uma discrepância da ordem dos 10 mm, por defeito, aos do último aditamento da referida norma (informação verbal disponibilizada pela Doutora Rosário Veiga). Assim, tomaram-se como aceitáveis, valores que se situassem dentro do intervalo 140±10 mm.

Para o caso das argamassas que apresentaram valores de espalhamento fora do referido intervalo, houve a necessidade de proceder à realização de novas amassaduras de forma a substitui-las.

A consistência por espalhamento é em parte condicionada pela influência humana devido ao manuseamento realizar-se de forma manual. A preparação do equipamento, o modo de colocação da argamassa no molde, a compactação manual e o ritmo de pancadas na mesa de espalhamento variam ligeiramente com o operador (MARTINS, 2010).

Para a realização do ensaio são necessários: Mesa de espalhamento; Cone; Pilão; Craveira; Régua; Rapa; Luvas.

Recorrendo a um pano molhado, humedeceu-se a mesa de espalhamento, o cone e o pilão.

Posteriormente, colocou-se o cone no centro da mesa de espalhamento e procedeu-se ao seu enchimento faseado, em duas camadas de argamassa, compactadas individualmente com um mínimo de 10 inserções do pilão.

Figura 3.4 - Ensaio de consistência por espalhamento: colocação do cone e preenchimento em 2 camadas.

Rasou-se o topo do cone com o auxílio de uma espátula, retirando-o de seguida cuidadosamente para que a argamassa mantivesse a forma interna do molde. De seguida rodou-se a manivela da mesa de forma a induzir 15 pancadas durante 15 segundos. Finalmente, utilizando a craveira e a régua, mediu-se o diâmetro do contorno da argamassa no topo da mesa em 3 diagonais diferentes, registaram-se os valores e determinou-se o valor médio e o desvio padrão.

Figura 3.5 - Ensaio de consistência por espalhamento: indução de 15 pancadas e medição dos diâmetros de contorno.

Os valores médios obtidos de algumas das argamassas não se situavam dentro do intervalo 140±10 mm. Assim decidiu-se realizar novas amassaduras, procedendo-se ao ajuste do volume de água introduzido na mistura.

No Anexo II apresentam-se todos os valores de consistência por espalhamento obtidos de todas as argamassas.

3.2.4. EXECUÇÃO DOS PROVETES

Para a execução dos provetes das diversas argamassas usaram-se moldes prismáticos de (40x40x160mm^3) de acordo com a norma NP EN 196-1 (IPQ, 2006). Os moldes foram previamente untos com óleo descofrante (50% massa consistente e 50% óleo de automóvel) de forma a evitar destacamentos da material a quando da desmoldagem.

Antes de proceder ao preenchimento do molde, procedeu-se à fixação deste e do seu acréscimo (peça de fixação molde-compactador) à extremidade do compactador mecânico. De seguida preencheu-se o molde até metade da sua altura com a argamassa fresca e iniciou-se a compactação induzindo 20 pancadas através do compactador mecânico; por fim, enche-se o molde na sua totalidade com uma nova camada de argamassa e voltou-se a compactar com mais 20 pancadas.

Figura 3.6 – Compactador e preenchimento do molde por camadas no compactador.

Finda a compactação, retirou-se o molde do compactador e rasou-se a face livre dos provetes. Por fim, inscreveu-se a designação da argamassa na face visível da base do molde e selou-se o conjunto num saco de polietileno, iniciando desse modo, o processo de cura.

Figura 3.7 – Provetes nos moldes após compactação à esquerda e selados em sacos de polietileno à direita.

3.2.5. DESMOLDAGEM E COLOCAÇÃO NA CURA HÚMIDA

Os moldes envoltos por sacos de polietileno foram acondicionados no laboratório onde foram realizadas as amassaduras segundo as condições de 23±3ºC e 65±5% de humidade relativa (HR). A norma EN 1015-11 (CEN, 1999/2006b), recomenda o armazenamento de provetes de cal aérea nos moldes e selados em saco de polietileno por um período de 5 dias, porém a essa data todos os provetes ainda não apresentavam um estado de endurecimento suficiente para a desmoldagem, pelo que esse procedimento foi feito apenas após 6 dias e só para os provetes que continham metacaulino na sua composição.

Para a realização da desmoldagem retiraram-se os moldes dos sacos estanques de polietileno.

O manuseamento dos moldes foi feito cuidadosamente tendo a remoção dos provetes sido feita com o auxílio de um pequeno martelo, procurando seguir uma sequência regular de remoção das laterais do molde.

Nos provetes inscreveu-se a sua designação, colocando-os de seguida num tabuleiro para serem transportados para a sala de cura húmida (23±3ºC e 95±5% de HR).

No processo de desmoldagem foi percetível uma facilidade maior de destaque dos provetes com traços volumétricos mais fortes (maior relação ligante-agregado), esse facto justifica o maior endurecimento e compacidade apresentado por estes.

Devido ao fraco estado de endurecimento evidenciado ao fim de 6 dias, os moldes com os provetes sem metacaulino, foram retirados dos sacos de polietileno e colocados em sala de cura controlada com condições de cura de referência (23±3ºC e 65±5% de HR).

Figura 3.8 – Desmoldagem dos provetes com Mk; transferência dos provetes sem Mk para cura de referência sem sacos polietileno.

No acompanhamento da cura dos provetes só de cal aérea, percebeu-se que estes apresentavam já as características necessárias para serem desmoldados ao fim de 3 dias na sala de cura controlada, pelo que procedeu-se à sua desmoldagem e à sua colocação na sala de cura húmida.

A desmoldagem das argamassas de substituição com metacaulino foi efetuada após 6 dias de cura nos sacos de polietileno. Para o caso das argamassas de substituição sem Mk houve a necessidade de antecipar em um dia o processo devido à impossibilidade de acesso ao laboratório no dia em causa, razão esta, justificativa do facto dos provetes L3 apresentarem à data uma aparência ainda pastosa tendo impossibilitado inclusivamente a inscrição da sua designação na lateral dos provetes.

No processo de manuseamento deu-se a rutura transversal de um dos provetes da referida série. Para evitar que tal situação se repetisse optou-se por colocar uma das laterais dos moldes numa posição contígua à base do molde e fazer deslizar o provete até que este assentasse sobre a lateral permitindo assim a sua colocação no tabuleiro de transporte para a cura húmida (figura 3.9).

De referir ainda que os provetes da série L1 sofreram uma retração axial excessiva sendo notório o espaçamento entre o molde e o provete. Esta situação foi quantificada no input de dados para determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

Figura 3.9 – Rutura de provete durante manuseamento; transporte para cura húmida sobre lateral do molde; retração no molde de provetes da argamassa L1.

A limitação de área do tanque para o elevado número de provetes a ensaiar (nos quais se incluem provetes realizados para outros trabalhos) obrigou à colocação de um sistema de suporte suplementar apoiado sobre o tanque.

Figura 3.10 - Colocação e disposição dos provetes na sala da cura húmida.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS AOS 28 E 90 DIAS – ENSAIOS

No sentido de obter resultados mais fidedignos quanto à quantificação das diversas características estudadas no âmbito desta dissertação, procurou-se sempre utilizar uma amostragem de cada uma das argamassas que traduzisse um valor médio associado a um desvio-padrão que permitisse uma rápida deteção de resultados singulares que constituíssem uma relevante discrepância face ao referido valor médio.

Optou-se dessa forma por determinar os valores médios dos ensaios através de conjuntos de 3 provetes por argamassa.

3.3.1. MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

O módulo de elasticidade dinâmico é um indicador da deformabilidade das argamassas, permitindo igualmente aferir sobre a gama de valores das suas resistências mecânicas. A deformabilidade das argamassas varia inversamente com o módulo de elasticidade.

A determinação do Módulo de elasticidade dinâmico realizou-se através de equipamento que emite diversas frequências de vibração para o estabelecimento da frequência de ressonância longitudinal do provete de ensaio, com base na norma NP EN 14146 (IPQ**,** 2006).

Antes da realização de todos os ensaios, todos os provetes foram sujeitos durante 24 horas a ambiente controlado à temperatura de 23 ± 3ºC e 65 ± 5% de humidade relativa em sala própria, de forma a baixarem e estabilizarem o seu teor de água, dado que este pode influenciar os resultados obtidos (FARIA, 2004). Cada provete foi ensaiado em duas posições distintas e foram realizadas até 6 medições por provete. O ensaio decorreu aos 28 e 90 dias.

Antes de iniciar o ensaio, os provetes foram pesados numa balança de precisão 0,001 g localizada na sala da cura de referência.

O ensaio inicia-se com a colocação do provete sobre um suporte aplicando-se nas suas extremidades a fonte emissora e a unidade de receção do equipamento de medição "Zeus Resonance Meter". O equipamento é comandado por um programa de cálculo, no qual é necessário introduzir os valores da massa e dimensões geométricas dos provetes.

O oscilador de frequência variável que alimenta o vibrador deve ser acionado, registando-se as amplitudes das vibrações correspondentes. As condições de ressonância estão criadas quando se obtêm amplitudes máximas. A frequência de ressonância longitudinal corresponde à frequência mais baixa para a qual se obtém uma amplitude máxima.

O programa deduz automaticamente o valor do Módulo de elasticidade dinâmico através da expressão:

$$E_{din} = \frac{2 \times L \times f_0 \times \rho}{g \times 10^{-4}} \qquad \text{(Equação 3.1)}$$

Em que:

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 [m / s^2];

Figura 3.11 – "Zeus Resonance Meter" e output do programa de cálculo para determinação do $E_{din.}$

3.3.2. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO

O ensaio decorreu para as 2 idades analisadas nesta dissertação, 28 e 90 dias.

Para a determinação deste parâmetro utilizaram-se 3 provetes inteiros de cada argamassa. Antes de proceder-se ao início dos trabalhos, determinou-se o Módulo de elasticidade dinâmico de cada provete. A combinação dos valores de R_C e R_T é importante na determinação da gama de valores corretos de Módulo de elasticidade dinâmico.

Como planeamento do ensaio, determina-se inicialmente a resistência à flexão dos provetes prismáticos 40x40x160 mm^3, utilizando-se de seguida uma das metades resultantes deste ensaio para determinar a resistência a compressão.

O ensaio foi, aos 28 dias, efetuado no equipamento ZWICK Z050 tendo o tratamento dos dados sido processado no computador anexo ao equipamento através do programa TestXpert v12.1 da Zwick Roell.

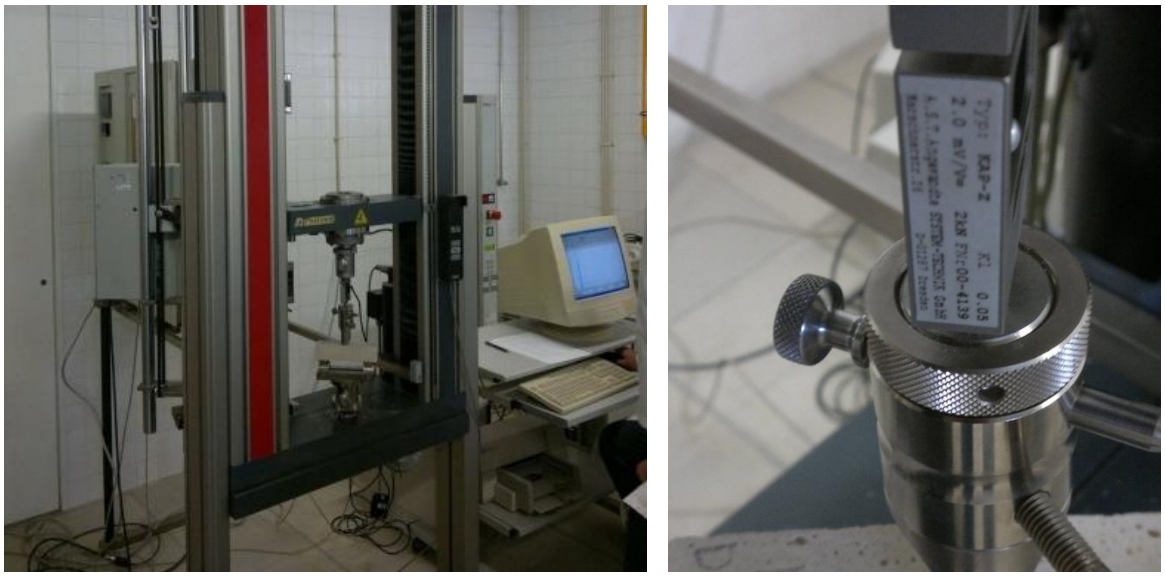

Figura 3.12 - Ensaio de resistência à tração por flexão operado pelo equipamento "ZWICK Z050".

3.3.2.1. **Procedimento do ensaio de R_T aos 28 dias na FCT-UNL**

Colocaram-se os provetes horizontalmente sobre o suporte, cujos apoios cilíndricos distam 100 mm um do outro. A face que se encontrava livre no molde foi disposta lateralmente, por apresentar uma textura irregular. Esta situação torna a secção transversal do provete variável linearmente, o que induziria alterações importantes ao valor final de Resistência à flexão, nomeadamente se esta fosse disposta virada para cima (por ficar sujeita a esforços de compressão durante o ensaio) ou virada para baixo (devido a esforços de tração).

Tanto os apoios como o cilindro de carga foram dispostos perpendicularmente ao provete, para tal, pequenos ajustes foram feitos no sentido de rotação do eixo axial do provete.

A célula de carga usada foi de 2,0 kN e a carga pontual foi aplicada de forma que a rutura ocorresse dentro do intervalo 30-90 segundos (0,2 mm / min) como estipula a norma EN 1015-11 (CEN,1999). Após rutura, registou-se o valor da carga máxima aplicada [N].

A resistência a flexão, dada em [MPa], é calculada através da expressão:

$$R_f = \frac{1{,}5 \times F_f \times L}{b^3}\text{, [MPa]} \qquad \text{(Equação 3.2)}$$

Em que:

R_f - Resistência à flexão [MPa];

F_f - Carga máxima aplicada sobre o provete pela célula de carga [N];

b - Lado da secção quadrada do prisma [mm];

L - Comprimento do provete entre apoios [mm];

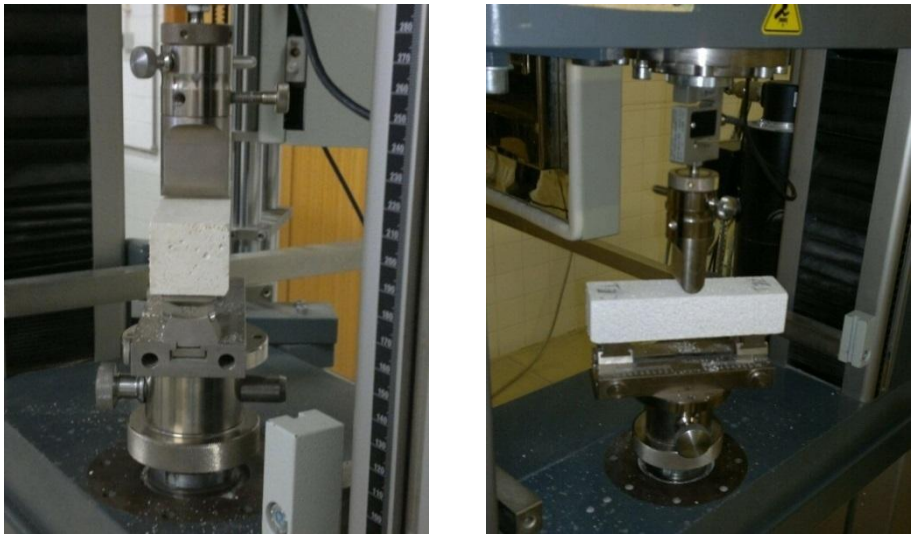

Figura 3.13 – Disposição transversal (à esq.) e longitudinal (à dir.) do provete no suporte para realização do ensaio de resistência à tração por flexão.

3.3.2.2. **Procedimento do ensaio aos 90 dias realizado no LNEC**

O ensaio de determinação de R_T 90 dias de idade decorreu na sala de ensaios do LNEC devido a avaria técnica do equipamento da FCT-UNL à data do ensaio. O procedimento diferiu no equipamento utilizado e na velocidade de aplicação de carga, a qual foi de 10 N/s em cada ensaio.

A colocação dos provetes e respetivo ajuste da prensa e dos suportes é controlado pelo operador, enquanto no equipamento ZWICK da FCT-UNL esse processo é automático. Desse modo, o manuseamento do provete requer bastante cuidado para que não se quebre durante a colocação no suporte.

O restante procedimento experimental decorreu como para os 28 dias, tal como o método de cálculo dos valores de resistência à tração, os quais são descritos anteriormente.

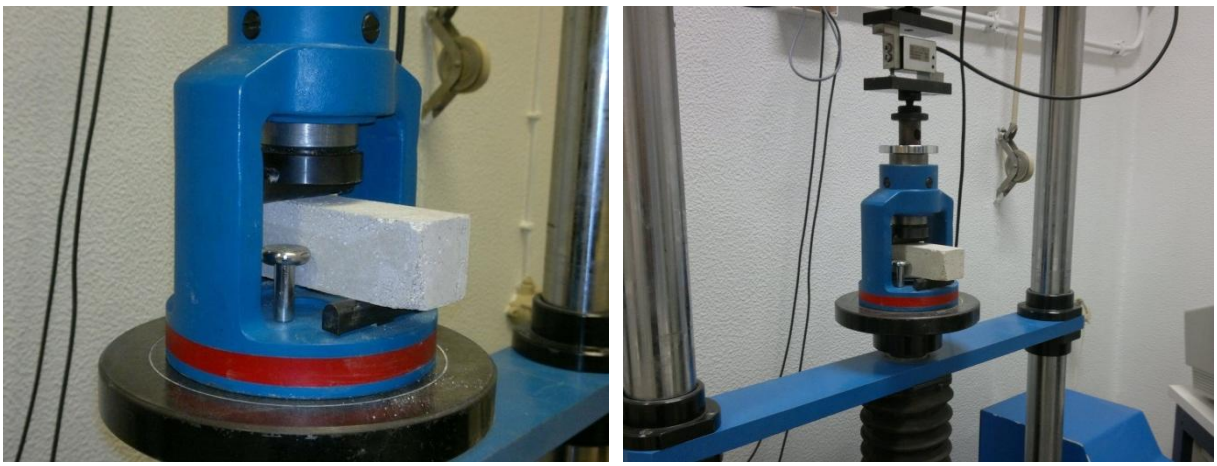

Figura 3.14 – Disposição dos provetes no equipamento de ensaio de R_T do LNEC.

3.3.3. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio é efetuado sobre a metade do prisma proveniente do ensaio de resistência à flexão, aquela que evidenciou ter a secção da base menos regular, uma vez que uma secção regular e melhor para o ensaio de absorção capilar.

Para este ensaio utilizou-se um dispositivo composto por 2 peças que garantisse uma secção de aplicação da tensão de 40x40 mm^2, esta foi posteriormente comprimida por uma célula de carga de 50kN e velocidade de aplicação da carga de 0,7 mm / min.

A colocação do provete entre as 2 peças do dispositivo deve ser cuidadosa, colocando as faces moldadas em contacto com as superfícies de transmissão da carga.

Assim como decorre para o ensaio de Resistência à Flexão, a face livre do provete foi disposta lateralmente, uma vez mais porque a sua textura irregular influenciaria não só o valor máximo da força de compressão bem como o tempo de ajuste do suporte às superfícies carregadas do provete.

3.3.3.1. **Procedimento do ensaio de R_C aos 28 dias na FCT-UNL**

Colocou-se a metade do provete entre as duas peças do dispositivo de compressão e disposta horizontalmente (as superfícies de contacto devem ser regulares com 40 mm de lado).

Centrou-se o dispositivo de compressão do provete no suporte inferior da prensa e fez-se o ajuste do espaçamento entre os elementos de suporte e de compressão da prensa de forma a minorizar o tempo para início efetivo de aplicação da carga sobre o provete.

Aplicou-se um "pre-load" de 100 N iniciando-se de seguida o ensaio. A aplicação da carga foi feita de forma que a rutura ocorresse dentro de um intervalo de 30-90 segundos após o início da aplicação efetiva de carga.

O ensaio decorre até se atingir a carga máxima – rutura. Esta fase corresponde à formação de rótulas plásticas na interface transversal entre a secção livre e a comprimida.

Após o registo do valor de Força máxima de compressão, o valor da Resistência à Compressão é deduzido através da expressão:

$$R_C = \frac{F_C}{b^2}, \text{[MPa]} \qquad \text{(Equação 3.3)}$$

Em que:

R_c - Resistência à compressão

F_c - Carga máxima aplicada sobre o provete através da célula de carga

b - Lado da secção quadrada do provete [mm]

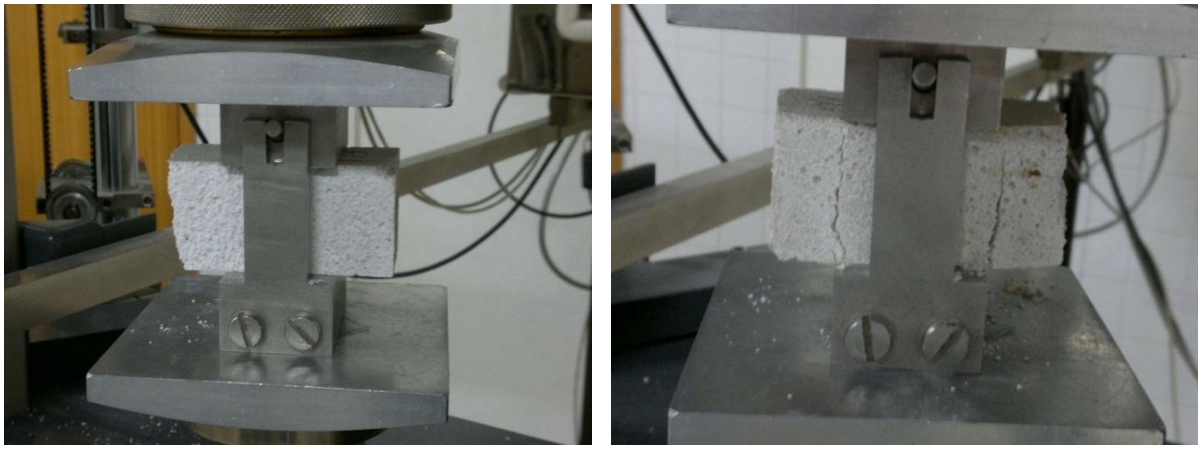

Figura 3.15 – Disposição do provete no suporte para ensaio de Resistência à compressão (à esq.) e formação de rótulas plásticas após aplicação da carga (à dir.).

3.3.3.2. **Procedimento do ensaio de R_C aos 90 dias no LNEC**

O ensaio decorreu no LNEC e foi realizado no mesmo equipamento utilizado para a determinação de R_T com respetiva alteração da prensa e suporte.

Face ao aparelho utilizado no ensaio aos 28 dias de idade e do referido ajuste manual da prensa, a célula de carga utilizada foi de 200 kN (a Zwick utiliza uma célula de 50 kN) a uma

velocidade de aplicação de carga de 50 N/s. Os provetes foram ensaiados sem a utilização de um molde metálico como se havia verificado para os 28 dias, uma vez que este se encontrava incorporado no equipamento.

O restante procedimento experimental decorreu como para os 28 dias, tal como o método de cálculo dos valores de resistência à compressão, os quais são descritos anteriormente.

3.3.4. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Este ensaio baseou-se nas normas EN 15801 (CEN, 2009) e EN 1015-18 (CEN**,** 2002).

Realizou-se na sala de cura de referência, garantindo assim que a temperatura estivesse dentro dos parâmetros da norma (23±3) °C.

A caracterização ocorreu para as idades de 28 e 90 dias e foi determinada por argamassa, pelo que interessa obter a média dos 3 provetes de cada argamassa.

Preparação do ensaio

Para o ensaio utiliza-se uma das metades que resultaram da rutura dos provetes após o ensaio à tração por flexão. A metade selecionada por provete foi a que apresentava a base mais lisa e regular.

Após a conclusão dos ensaios de caracterização das resistências mecânicas, o conjunto das metades escolhidas são colocadas em estufa a uma temperatura de 60 °C por um período que garanta a secagem total dos provetes.

Os provetes estiveram cerca de 80 horas em estufa aos 28 dias (devido à interceção com um fim de semana); aos 90 dias o período em estufa foi de aproximadamente 45 horas.

Figura 3.16 – Preparação do ensaio de absorção por capilaridade aos 28 dias: retirada dos provetes da estufa (à esq.) caixa onde decorre a absorção (ao centro) verificação da altura de água necessária (à direita).

Para a realização do ensaio, foram utilizadas caixas estanques transparentes. No interior destas colocou-se um tabuleiro rígido apoiado em 2 tijolos. Previamente, a caixa foi parcialmente cheia com água até ao nível da altura dos tijolos. De forma a garantir a horizontalidade e uniformidade da altura de água em toda a base de assentamento dos provetes, utilizou-se um nível de bolha. A base do tabuleiro foi revestida com uma rede de borracha. Por fim adicionou-se uma altura de 5 mm de água dentro do tabuleiro.

Procedimento do ensaio

O ensaio iniciou-se com a pesagem dos provetes imediatamente após a sua retirada da estufa; para tal usou-se uma balança digital de precisão 0,001 g.

Após pesagem dos provetes, estes foram colocados imediatamente sobre o tabuleiro no interior da caixa estanque com algum espaçamento entre eles, com a base em contacto com a altura de água, de forma a iniciarem a absorção. Por esse motivo foi necessário utilizar 2 caixas estanques; uma comportou 15 e outra 12 provetes em ambas as idades.

Entre pesagens teve-se sempre o cuidado de verificar e repor a altura de água sobre o tabuleiro.

O primeiro valor obtido é denominado como a massa seca do provete- m_{seca} - este serve tanto como ponto de referência inicial para a determinação da quantidade de água absorvida [kg/m^2] por provete, como para o cálculo do teor de água (W_t) dos provetes, parâmetro este importante na caracterização do ensaio de secagem.

A massa de água absorvida por unidade de área, ao fim de um dado período de tempo, é obtida pela expressão:

$$\mathbf{M_i = (m_i - m_{seca})/S} \ [kg/m^2] \qquad \text{(Equação 3.4)}$$

Sendo:

$\mathbf{m_i}$ – massa do provete no instante t_i [kg]

$\mathbf{m_{seca}}$ – massa do provete seco, no início do ensaio [kg]

S – área da superfície do provete em contacto com a água [m^2]

A partir dos valores obtidos traça-se um gráfico da curva de absorção capilar, o qual relaciona a quantidade de água absorvida [kg/m^2] com o tempo de ensaio decorrido, dado pela raiz quadrada do tempo [min.^{0,5}] (FARIA, 2004).

Os parâmetros que se pretendem caracterizar com o ensaio são a determinação do Coeficiente de Capilaridade (CC) e o Valor Assimptótico (VA) da curva de absorção.

O Valor Assimptótico [kg/m^2] exprime a quantidade máxima de água que pode ser absorvida por provete (considerando a média de provetes com volume semelhante). Assume-se que este valor é atingido quando a variação da massa do provete entre duas pesagens sucessivas e intervaladas por 24 horas, seja inferior a 1% da massa seca do provete (CEN,2009).

O Coeficiente de Capilaridade [kg/m^2.min.^{0,5}] indica a velocidade a que a absorção de água se processa na fase inicial do ensaio. A nível gráfico, traduz-se pelo declive do tramo linear inicial. A sua determinação segundo a norma EN 15801 (CEN,2009) requer a sua obtenção a partir do alinhamento de 5 pontos do gráfico, entenda-se, pesagens sucessivas. Dessa forma obtiveram-se registos da massa com maior frequência nos primeiros instantes do ensaio.

No primeiro dia as pesagens realizaram-se aos 5, 10, 15, 30, 60, 120 e 180 min; a partir deste os registos foram feitos com um intervalo de 2 horas.

Procurou-se manter os registos com este intervalo até a absorção capilar estabilizar, ou seja atingir-se um patamar horizontal da curva de absorção capilar.

As argamassas de traço volumétrico 1:1, nomeadamente as L1_Mk30 e L1_Mk50 demoraram um período de tempo consideravelmente superior a estabilizar face às restantes argamassas, razão pela qual optou-se por obter as pesagens intervaladas por períodos relativamente mais longos até estas terem atingido o referido patamar.

3.3.4.1. **Diferenças de procedimento dos 28 para os 90 dias**

Aos 28 dias os provetes foram colocados nas caixas sem qualquer invólucro que garantisse a impermeabilização das faces verticais. Aos 90 dias essa situação foi alterada, tendo-se envolvido os provetes lateralmente numa película de Celofane, deixando-se apenas a base e o topo livres. Esta medida visou promover a unidireccionalidade do fluxo de absorção capilar, ou seja, garantir que esta se processa verticalmente, sem influência de evaporação lateral.

A colocação das películas isolantes no ensaio a 90 dias prolongou a duração do ensaio; este assunto será estudado mais aprofundadamente nos capítulos referentes à análise e à discussão de resultados.

De referir ainda que no ensaio aos 90 dias das argamassas de substituição foram colocadas gazes presas por elástico na base dos provetes, de forma a impedir perdas de massa por destacamento de material.

Figura 3.17– Disposição dos provetes nas caixas durante o ensaio de absorção capilar aos 28 dias (à esq.) e 90 dias (à dir.).

3.3.5. ENSAIO DE SECAGEM

O ensaio inicia-se imediatamente após a última pesagem do ensaio de capilaridade, que ocorre quando a variação entre duas pesagens sucessivas com 24 horas de intervalo não supera 1% da massa seca do provete (CEN, 2009).

O procedimento decorreu no DEC/FCT–UNL, na sala de cura de referência onde a temperatura se situa entre valores de 23 ± 3°C e a Humidade Relativa de 65 ± 5%.

O ensaio consiste na pesagem sucessiva dos provetes de argamassa até a massa se aproximar do valor do provete seco.

Os parâmetros que influenciam a secagem são a temperatura, a humidade relativa e a velocidade do ar. Estas condições pressupõem-se constantes ao longo da duração total do ensaio.

Assim como ocorre para o ensaio de absorção capilar, a variação de massa é mais acentuada nas primeiras horas. Este fenómeno sucede devido a uma continuidade da fase líquida derivada da maioria dos poros estarem preenchidos com água; dessa forma a evaporação ocorre à superfície, onde se localiza a frente de secagem. A variação do W_t[5] é linear nesta fase (BRITO et al., 2011).

Numa segunda fase, a frente de secagem recua para o interior do provete; assim sendo o transporte de água da frente húmida até à superfície do material passa então a dar-se por difusão do vapor no espaço poroso. Com o progressivo recuo da frente, aumenta o percurso da difusão de vapor, o que resulta numa diminuição da percentagem de secagem do material, ou seja, menor variação do W_t para intervalos de tempo regulares.

No caso dos provetes com dosagem superior em ligante, existe maior coesão da argamassa que dificulta a penetração do ar dentro do provete; a difusão do vapor de água no material torna-se mais difícil, razão pela qual algumas argamassas apresentavam ainda valores significativos de W_t ao fim de vários dias de ensaio.

Figura 3.18 - Disposição dos provetes no decorrer do ensaio de secagem.

[5] Teor de água [%]

As faces laterais dos provetes foram envoltas numa película fina, transparente e aderente. A aplicação desta confere estanquicidade nas faces cobertas (figura 3.18 à esq.). Além das laterais, também a base dos provetes foram apoiadas sobre uma bancada lisa. O objetivo era garantir que o fluxo de evaporação fosse unidirecional.

Para a execução do ensaio são necessários:

- Balança digital com precisão de 0,001 g
- Malha quadriculada plástica
- Gazes
- Plásticos
- Celofane

Realizaram-se as pesagens em intervalos regulares, sendo mais frequentes nas primeiras horas de ensaio.

Anotaram-se os valores com precisão até à milésima de grama.

A evolução do ensaio é mesurada pelo decréscimo do teor em água do provete ao longo do tempo; assim, o ensaio termina quando este valor se aproxima de 0 %, uma vez que W_t é obtido pela relação entre a massa do provete no instante considerado do ensaio e a massa do provete seco, e dada pela pesagem inicial do ensaio de absorção capilar.

A expressão do W_t é então dada por:

$$\boldsymbol{W_i} = \frac{\boldsymbol{m_i} - \boldsymbol{m_0}}{\boldsymbol{m_0}} \times 100\ \% \qquad \text{(Equação 3.5)}$$

Em que:

$\boldsymbol{W_i}$ – teor em água [%]

$\boldsymbol{m_i}$ – massa do provete no instante t_i [kg]

$\boldsymbol{m_0}$ – massa do provete seco [kg]

Através do valor médio de $\boldsymbol{W_i}$ de cada argamassa, é possível definir um gráfico que demonstre a evolução da secagem ao longo tempo.

O parâmetro que permite aferir a velocidade de secagem de cada argamassa é o Índice de Secagem e é dado pela seguinte expressão:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n}[(t_i - t_{i-1}) \times \frac{W_{i-1} + W_i}{2}]}{W_{máx} \times t_f} \qquad \text{(Equação 3.6)}$$

Em que:

$\boldsymbol{IS}$ – Índice de Secagem

$\boldsymbol{t_i}$ – tempo de ensaio no instante "*i*" [h]

$\boldsymbol{t_f}$ - tempo total do ensaio [h]

$\boldsymbol{W_i}$ – Teor em água do provete no instante i [%]

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

A Taxa de Secagem (TS) é o parâmetro que permite determinar a velocidade de secagem inicial média das argamassas. O valor é dado pelo módulo do declive à curva de secagem nos cinco primeiros pontos de medição efetuados.

3.3.6. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE ABERTA

O trabalho experimental consistiu na determinação da porosidade aberta através da absorção de água sob vácuo e da pesagem das amostras dos provetes imersas.

A Porosidade aberta é o quociente (sob a forma percentual) entre o volume dos poros abertos – $\boldsymbol{V_{op}}$ e o volume aparente do provete - $\boldsymbol{V_a}$ – NP EN 1936 (IPQ, 2008)

O ensaio de determinação da porosidade aberta efetuou-se aos 28 e 90 dias de idade, tendo sido efetuado na FCT-UNL.

A metodologia de ensaio adotada diferiu ligeiramente dos 28 para os 90 dias. As amostras dos provetes das argamassas de substituição foram, aos 90 dias, envolvidos por um tecido fino de nylon (collants). Esta adoção foi implementada devido à água dentro do exsicador apresentar muitas partículas de massa em suspensão ou mesmo depositadas na base do mesmo a quando do fim do ensaio. Assim, a massa que se destacou das amostras ficou retida nos collants de nylon.

Procedimento do ensaio

O ensaio teve por base a NP EN 1936 (IPQ, 2008). Assim como decorreu para o ensaio de absorção capilar, foi necessário garantir a secagem total das amostras dos provetes à data do início do ensaio (para ambas as idades de estudo), pelo que se colocaram as amostras em estufa a 60±5°C por um período superior a 48 horas até massa constante.

Após este processo, limpou-se o material mais friável à superfície das amostras e de seguida procedeu-se à pesagem da massa seca das amostras numa balança de precisão 0,001 g. Após a pesagem das amostras de todos os provetes, obtendo-se a $\mathbf{M_d}$ - massa seca da amostra, dispuseram-se os mesmos em espiral e sequencialmente na base do exsicador, de forma a identificar rapidamente os provetes a quando da pesagem final.

O ensaio é dividido em três fases. A primeira parte caracteriza-se por fechar as válvulas do sistema de forma a selar o exsicador; associando o sistema a uma bomba de vácuo, induziu-se uma pressão de 2667 Pa (20 mm de mercúrio e dentro do padrão da norma) por um período de 24 horas (a norma indica 2 h ± 0,2 h) de modo a eliminar o ar contido nos poros abertos das amostras.

Numa segunda fase, introduziu-se água potável (a norma indica água destilada) no sistema durante um mínimo de 15 min e a uma temperatura entre 15 a 20°C até à total submersão das amostras. A depressão induzida pela bomba de vácuo foi mantida durante o processo de introdução da água e manteve-se o sistema nestas condições por mais 24 horas (a norma menciona apenas o período de 15 min para a introdução da água destilada).

Por fim, na terceira fase, desligou-se a bomba de vácuo e abriram-se as válvulas que estancavam o sistema de forma a restaurar a pressão atmosférica no interior do recipiente. Deixou-se as amostras dos provetes imersos sujeitas a esta nova condição por mais 24 horas.

Figura 3.19 – Determinação da Porosidade aberta: amostras no exsicador ligado a bomba de vácuo.

Após conclusão do ciclo, voltou-se a pesar as amostras obtendo-se primeiro valor de massa:

- **M_h** - massa da amostra do provete imersa (massa hidrostática, obtida por suspensão da amostra em suporte pendurado na parte inferior da balança digital).

No seguimento, retiraram-se as amostras da água, as quais foram assentes por breves segundos sobre um pano de forma a retirar o excesso de água na superfície e colocou-se a amostra sobre o prato da balança de forma a obter o último valor de pesagem:

- **M_s** – massa das amostras dos provetes saturadas

Após a obtenção de todos os valores, determinou-se a percentagem de poros abertos, segundo a expressão:

$$P_{ab} = \frac{M_s - M_d}{M_s - M_h} \times 100 \quad [\%] \qquad \text{(Equação 3.7)}$$

Para o ensaio a 90 dias de idade, as amostras dos provetes, previamente pesadas, foram envolvidos em collants de nylon. De forma a minimizar a perda de massa deram-se nós nas extremidades de cada collant (uma amostra de argamassa por collant), repetiu-se o procedimento de pesagem dos 28 dias para determinação de M_d, M_h e M_s das amostras envoltas pelos collants.

Sendo o nylon dos collants, um material pouco higroscópico, a determinação do P_{ab} foi feita pela subtração do peso de cada um dos collants aos 3 valores de massa descritos acima, e posterior determinação de P_{ab} pela expressão acima descrita.

Figura 3.20 – Determinação de P_{ab} aos 90 dias: método de colocação das amostras nos collants (à esq.) e disposição no exsicador (à dir.).

3.3.7. ENSAIOS QUÍMICOS E MINERALÓGICOS

Após a realização do ensaio de compressão de cada um dos provetes, as 3 frações que se formaram segundo as rótulas plásticas induzidas pela compressão, foram divididas cada uma para uma finalidade diversa. No caso da fração que foi efetivamente comprimida, esta, foi colocada num saco plástico (uma amostra por argamassa) e imediatamente fechados para que a cura fosse interrompida.

Os ensaios a estas frações decorreram no LNEC tendo sido operados pelo bolseiro André Gameiro. O trabalho laboratorial realizado procura obter informações mais precisas quanto à composição química e mineralógica das argamassas bem como aferir sobre a tendência de ocorrência da reação de carbonatação e pozolânica.

3.3.7.1. **Preparação das amostras**

As amostras tinham alguma humidade, pelo que foi necessário colocá-las por 24 h em estufa a 40ºC, tendo sido colocadas de seguida no exsicador até à realização do ensaio.

A preparação das amostras seguiu 3 procedimentos distintos, de forma a realizar o ensaio de MEV (não analisado no âmbito desta dissertação), Fração Fina e Amostra Global.

Os procedimentos para preparação das amostras divergem para cada uma das análises, assim para preparar a amostra que será analisada por DRX, denominada por Fração Fina, é necessário selecionar uma fração coesa do provete que contenha visivelmente ligante(s), desagrega-la através de movimentos de fricção por pressão e rotação de um martelo de borracha sobre a amostra, evitando movimentos de pancadas". Após este passo faz-se passar a amostra fraturada pelo peneiro de abertura de malha de 106 μm; o procedimento deve ser repetido para cada argamassa e até produzir-se uma quantidade suficiente para a realização do ensaio.

Figura 3.21 - Preparação das Frações Finas.

Para a preparação da amostragem para realização do ensaio de termogravimetria (TGA) cuja amostra é denominada por Amostra Global, o procedimento mantém-se à exceção da forma como se tritura a amostra, neste caso utiliza-se um almofariz para a moagem fazendo passar posteriormente a fração pelo peneiro 106 μm até que a dosagem seja suficiente para a realização do ensaio.

Figura 3.22 - Material necessário à preparação das Amostras Globais.

As técnicas ensaiadas foram a análise por difração de raios X (DRX), a análise termogravimétrica e por diferencial térmico (TG – ADT) das amostras.

3.3.7.2. **Análise por difração de raios X**

Para a realização do ensaio de difração de raios X selecionou-se uma porção da Fração Fina de forma a preencher o porta-amostras, como evidencia a figura 3.23 à esquerda.

Figura 3.23 - Porta Amostras (à esq.) e Difractómetro Philips PW3710 (à dir.).

O ensaio consistiu em fazer incidir um feixe de raios X de cobalto sobre a amostra, o qual permite gravar dados entre 3-74º 2θ, com incremento de 0.05 º2θs^{-1}. O difratograma foi obtido num difractómetro de raios X Philips PW3710.

A análise por difração dos raios X baseia-se no facto dos planos cristalográficos de um composto irradiado por um feixe monocromático de raios X com comprimento de onda λ refletirem a radiação quando se cumpre a Lei de Bragg (CHATTERJEE, 2000, citado por PINTO, 2004):

$$\mathbf{2d.sen\ \theta = n\ \lambda} \qquad \text{(Equação 3.8)}$$

onde:

n –é um número inteiro;
λ – o comprimento de onda dos raios X;
d – distância interplanar (específica de cada substância);
θ - ângulo de incidência do feixe;

Uma vez que um dado comprimento de onda do feixe de raios X verifica-se apenas numa dada gama de valores de ângulo **θ** de difração**,** segundo a lei de Bragg, o valor de **d** (distância interplanar) fica desse modo inequivocamente determinado, ou seja, a reflexão é seletiva e a cada valor de **d** (correspondente a uma família de planos reticulares) corresponde um ângulo específico (PINTO, 2004).

A partir da determinação desta incógnita e recorrendo a uma base de dados instalada no computador anexo ao equipamento de análise, consegue-se identificar a espécie cristalográfica por comparação com difratogramas previamente conhecidos e específicos de cada grupo mineral. A identificação das espécies cristalinas é feita por comparação sistemática da posição e intensidade de

todos os picos de difração do difratograma da espécie desconhecida com os do difratograma padrão (PINTO, 2004).

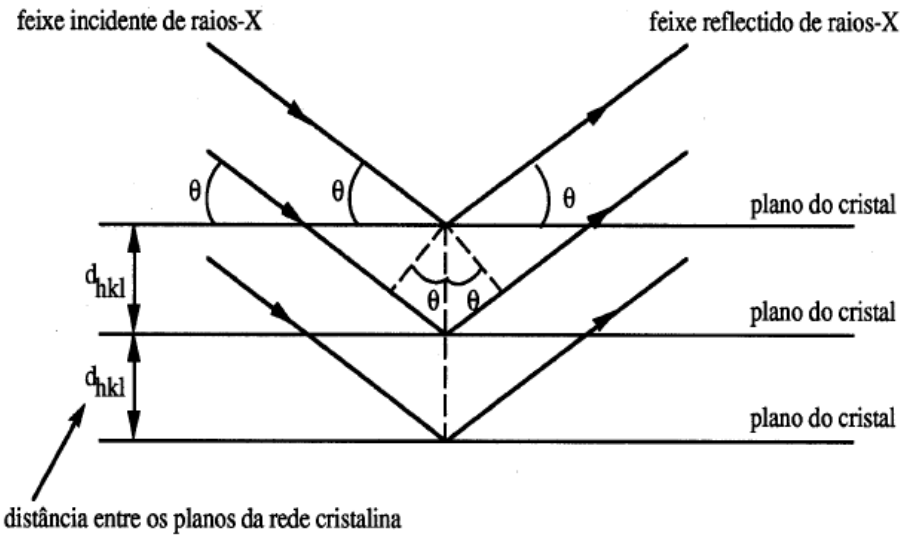

Figura 3.24 – Esquema da ação dos feixes de raios X (PINTO, 2004).

3.3.7.3. **Análise termogravimétrica e por diferencial térmico (TG – ADT)**

Com a análise termogravimétrica, obtém-se um termograma contínuo da variação de massa de um material em função da temperatura a que este é aquecido, através de aquecimento/arrefecimento a velocidade constante. Neste registo figuram variações mais ou menos acentuadas correspondentes a alterações químicas no material como por exemplo desidroxilação, oxidação, carbonatação ou hidratação. Cada material tem a sua curva típica, permitindo assim a sua deteção através desta técnica (VELOSA, 2007).

Tal como numa impressão digital, a identificação da espécie cristalográfica é feita por comparação direta com fichas de difração previamente conhecidas e específicas de cada grupo mineral. Existe igualmente um software específico para identificação em computador, com apoio numa base de dados bastante completa. A identificação das espécies cristalinas é feita por comparação sistemática da posição e intensidade de todos os picos de difração do difratograma da espécie desconhecida com os do difratograma padrão (Pinto, 2004).

A análise térmica diferencial (ATD) é uma técnica em que se regista o diferencial de temperatura entre uma substância e um material de referência (imutável para a gama de temperaturas do ensaio) em função do tempo ou da temperatura, quando as duas substâncias são submetidas a um mesmo ciclo de aquecimento. As diferenças de temperatura surgem da emissão ou absorção de calor oriunda da substância em análise (respetivamente, processos exotérmicos e endotérmicos). Assim, são detetáveis não só as variações de massa (perdas por desidratação, descarbonatação, entre outras), mas também transformações estruturais, recristalizações, etc., as quais não produzem variações de massa mas emitem ou absorvem calor. A curva ATD, além de ser intrínseca a uma só substância, o que a

torna bastante útil para a identificação de substâncias reativas ao calor, permite a obtenção de dados quantitativos a partir das áreas integradas dos picos.

Os termogramas das amostras de argamassas estudadas foram efetuados num sistema de análise térmica, sob atmosfera inerte (Árgon – 3 L/h), com velocidade de aquecimento uniforme de 10 °C /min, entre a temperatura ambiente e os 1000°C.

Procedimento

Após secagem em estufa a 40ºC, as amostras foram moídas até passarem pelo peneiro de abertura de malha 106 μm. A análise térmica simultânea foi realizada num analisador SETRAM TG-DTA, numa atmosfera de árgon, com uma taxa de aquecimento de 10ºC/min, desde a temperatura ambiente até aos 1000ºC, de acordo com o indicado anteriormente. O conteúdo de portlandite livre nas amostras, foi determinado pela perda de massa no intervalo de 380 – 500ºC, correspondente à desidroxilação da portlandite. A quantidade de CO_2 presente nas amostras foi atribuída à perda de massa no intervalo de 500-850ºC, que corresponde à descarbonatação da calcite (GAMEIRO et al., 2012).

Figura 3.25 – Equipamento SETRAM TG-DTA.

3.3.8. ENSAIO DE CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

O ensaio decorreu aos 135 dias de idade, tendo para tal sido utilizados os provetes 1 e 2 de cada argamassa. Em rigor, foram ensaiados os meios provetes utilizados para a caracterização das resistências mecânicas, da absorção por capilaridade e da secagem aos 28 dias.

Para a medição da condutibilidade térmica, usou-se um aparelho ISOMET 2104 o qual processa os registos térmicos obtidos por uma sonda de superfície (figura 3.26), estas permitem apenas medições em materiais sólidos e rígidos. Tendo sido concebida para registar valores fidedignos de

amostras com cerca de 60 mm de diâmetro e 10-15 mm de espessura (consoante a difusibilidade térmica do material), os valores obtidos pela sonda não são precisos uma vez que a superfície do provete é retangular com aproximadamente 80 x 40 mm^2, pelo que os valores registados serviram apenas para estabelecer um padrão de comparação entre os coeficientes de condutibilidade térmica das argamassas estudadas.

Os provetes foram assentes sobre uma placa de XPS para isolar o sistema (sonda + provete) e não permitir a transmissão do calor para o material adjacente, no caso a bancada do laboratório.

A medição baseia-se na análise da resposta térmica do material analisado aos impulsos de calor emitidos pela sonda da máquina. O fluxo de calor é criado através de uma resistência elétrica induzida à sonda, a qual está em contacto direto com o provete ensaiado. A avaliação da condutibilidade térmica é feita através do registo periódico dos valores de temperatura em função do tempo.

O output da máquina é o coeficiente de condutibilidade térmica, ou lambda –**λ [**W/m.K].

A máquina permite determinar igualmente a velocidade da dissipação do calor – **a** [m^2/s].

Dessa forma, numa fase inicial a máquina reduz a temperatura do provete até cerca de 20,5 °C, quando atinge esta temperatura, a sonda induz calor ao provete fazendo atingir temperaturas de cerca de 28-29 °C, esta fase corresponde à primeira metade do ensaio; na segunda metade, a sonda retorna à temperatura inicial medindo no decorrer desta segunda fase, a energia sobre a forma de calor que não sendo devolvida pelo provete, terá sido dissipada.

Os fatores que podem influenciar a qualidade da medição são:

- Qualidade da superfície de contacto sonda-provete;
- Variação da temperatura;
- Anisotropia do material;
- Humidade do provete;
- Dimensões finitas e homogeneidade do provete;

Figura 3.26 – Aparelho ISOMET 2104 (à esq.) e sonda de superfície (à dir.) durante medição

3.3.9. ENSAIO DE ATAQUE DOS SULFATOS

O presente ensaio baseia-se na norma NP EN 12370 (IPQ, 2001) a qual foi desenvolvida para pedras naturais, pelo que foram adotadas algumas alterações em virtude do material em análise.

O ensaio foi realizado aos 145 dias de idade das argamassas. Para a sua realização foram utilizados todos os provetes caracterizados às resistências mecânicas, à absorção de água por capilaridade e secagem, tanto aos 28 como aos 90 dias. Assim, importa referir que o conjunto dos meios provetes 1-3 de cada uma das argamassas, estiveram após desmoldagem e até aos 28 dias de idade na cura húmida, após a qual permaneceram sempre na sala de cura standard. Para os provetes 4-6, isto é, submetidos aos ensaios supracitados, mas aos 90 dias, importa referir que só após esta idade foram mantidos em cura standard.

Procedimento

Em caixas de plástico transparentes e estanques preparou-se uma solução de 329 g sulfato de sódio anidro (Na_2SO_4) com 99,9% de pureza diluído em 10 litros de H_2O até obter uma solução homogénea.

Os meios provetes foram colocados em estufa a 105±5°C por um período de 24 horas, de forma a garantir a sua total secagem e massa constante.

Após as 24 horas e utilizando uma balança digital de precisão 0,001 g, procedeu-se à pesagem de todos os provetes respeitando a sequência numérica das argamassas, esta medida revela-se determinante com o avançar dos ciclos uma vez que a ação da solução pode apagar a designação da face do provete. A disposição dos provetes é feita cuidadosamente sobre um estrado previamente colocado no fundo das caixas transparente e feita de forma a garantir um espaçamento de 10 mm entre provete e 20 mm para as paredes do recipiente. Foi tida em conta a altura de solução acima do topo dos provetes, a qual foi sempre superior a 10 mm.

Figura 3.27 – Acondicionamento dos meios provetes na estufa (à esq.) e disposição dos provetes dentro da caixa com solução de Na_2SO_4 (à direita).

Cada ciclo durou 2 horas após as quais os meio provetes são recolocados na estufa nas condições acima referidas. Após 24 horas do início do ensaio os provetes voltaram a ser retirados da estufa e pesados, concluindo assim um ciclo.

Foram efetuados um máximo de 20 ciclos para os provetes que não tinham sido totalmente destruídos até então.

O elevado número de provetes analisados não permitiu uma secagem dos meios provetes uniforme na estufa, pelo que a cada novo ciclo foram detetados provetes com alguma humidade visível.

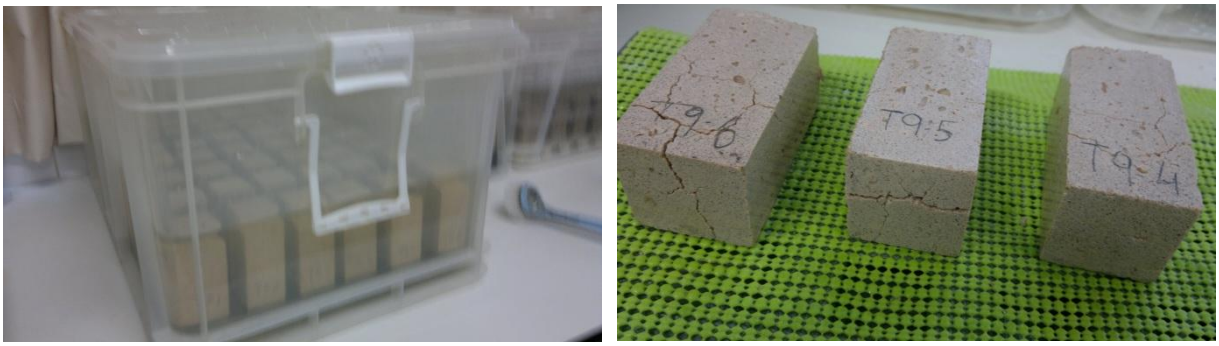

Figura 3.28 – Meios provetes imersos na solução (à esq.) e meios provetes de L1_Mk50 fendilhados ao fim do 5º ciclo (à direita).

4. ANÁLISE E TRATAMENTO DE RESULTADOS

No desenvolvimento desta dissertação realizaram-se ensaios que permitiram caracterizar as propriedades dos materiais estudados em 3 estágios distintos:

- Caracterização das matérias-primas;
- Caracterização das argamassas no estado fresco;
- Caracterização das argamassas no estado endurecido.

Para potenciar a sua apresentação e permitir uma melhor comparação entre os dados apresentados nesta secção, fez-se recurso a tabelas e gráficos.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

4.1.1. BARIDADE

Como indicado anteriroremente, a determinação da baridade dos constituintes das argamassas foi realizada fora do âmbito desta dissertação, no decorrer dos trabalhos experimentais realizados no LNEC inseridos nos projetos financiados pela FCT-MEC METACAL e LIMECONTECH. Os materiais utilizados foram os mesmos usados nos trabalhos experimentais de suporte às dissertações dos engenheiros Rodrigo Massena (MASSENA, 2011) e Nuno Felgueiras (FELGUEIRAS, 2011), pelo que o cálculo das quantidades necessárias para a formulação das argamassas foi feito adotando os valores de baridade obtidos para os referidos trabalhos experimentais e apresentados no quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Valores de baridade das matérias-primas.

Baridade (g/cm^3)		
Ligantes	Cal aérea*	**0,362**
	Metacaulino#	**0,294**
Agregados	Areia APAS 12	**1,412**
	Areia APAS 20	**1,405**
	Areia APAS 30	**1,388**
	Mistura areias	**1,463**

* Lusical CL 90
# Argical M1200S

A mistura de areias foi feita segundo o traço volumétrico: 1:1,5:1,5 de areias APAS 12, APAS 20 e APAS 30, respetivamente. A sua formulação permitiu criar uma mistura bem graduada, com um valor de volume de vazios inferior ao de cada areia individualizada e com maior compacidade, tendo por isso um valor de baridade superior a qualquer uma das areias isoladamente.

4.1.2. TRAÇO PONDERAL E RELAÇÃO ÁGUA / LIGANTE

Os traços volumétricos das argamassas são de 1:3 no caso das argamassas L3 (com ou sem Mk), 1:2 no caso das L2 e 1:1 no caso das L1. No caso das argamassas com Mk, 30% ou 50% da massa de cal aérea correspondente ao volume de ligante do traço respetivo é substituído por massa idêntica de Mk. No quadro 4.2 estão expressos os traços ponderais (cal aérea + metacaulino: mistura areias) e (cal aérea: metacaulino: mistura de areias), bem como as relações ponderais de água / (cal aérea + metacaulino) e água / cal aérea respetivamente.

Quadro 4.2 - Traços ponderais e relação água / ligante das argamassas.

Argamassa	Designação	Traço Ponderal (L: Mk : mist. areia)	Traço Ponderal ((L+Mk): mist. areia)	Água/(L+Mk)	Água / L
T1	**L3**	1:0:11,6	1:11,6	2,6	2,6
T10	**L3-2**	1:0:11,6	1:11,6	2,5	2,5
T2	**L3_Mk30**	1:0,4:16,6	1:11,6	2,5	3,5
T11	**L3_Mk30-2**	1:0,4:16,6	1:11,6	2,5	3,6
T3	**L3_Mk50**	1:1:23,2	1:11,6	2,5	5,1
T12	**L3_Mk50-2**	1:1:23,2	1:11,6	2,6	5,2
T4	**L2**	1:0:7,7	1:7,7	1,7	1,7
T5	**L2_Mk30**	1:0,4:11,1	1:7,7	1,8	2,6
T6	**L2_Mk50**	1:1:15,5	1:7,7	1,8	3,7
T7	**L1**	1:0:3,9	1:3,9	1,0	1,0
T13	**L1-2**	1:0:3,9	1:3,9	1,1	1,1
T8	**L1_Mk30**	1:0,4:5,5	1:3,9	1,1	1,6
T14	**L1_Mk30-2**	1:0,4:5,5	1:3,9	1,1	1,6
T9	**L1_Mk50**	1:1:7,7	1:3,9	1,2	2,3

Os valores da tabela mostram que existem diferenças nos valores da relação água / ligante entre as argamassas originais e as argamassas de substituição que foram realizadas com ajustes na quantidade de água de amassadura para maior aproximação à gama de consistência por espalhamento. Esta discrepância justifica-se com a regulação da água de amassadura necessária para a obtenção de uma argamassa com boa trabalhabilidade. Este tema será abordado com maior detalhe na secção 4.2.1

4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

4.2.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

Quadro 4.3 - Valores de consistência por espalhamento.

Argamassa	Designação	Espalhamento (mm)	Dp (mm)
T1	**L3**	154	4
T10	**L3-2**	143	5
T2	**L3_Mk30**	126	6
T11	**L3_Mk30-2**	139	5
T3	**L3_Mk50**	121	1
T12	**L3_Mk50-2**	144	2
T4	**L2**	129	2
T5	**L2_Mk30**	143	1
T6	**L2_Mk50**	138	2
T7	**L1**	125	1
T13	**L1-2**	135	1
T8	**L1_Mk30**	133	4
T14	**L1_Mk30-2**	140	1
T9	**L1_Mk50**	138	2

Segundo o referido no subcapítulo anterior, verificou-se uma alteração da relação Água/Ligante entre argamassas originais e substituições, motivada pelo acerto do volume de água de amassadura adicionado à mistura. A razão do acerto prende-se com o referido em 3.2.3. onde se justifica que os valores aceitáveis de consistência por espalhamento devem situar-se no intervalo 140±10 mm.

Foram realizadas novas amassaduras para 5 das 9 argamassas formuladas. A argamassa L3 apresentou um valor de espalhamento superior ao limite do referido intervalo, pelo que procedeu-se à realização de nova amassadura, mantendo as dosagens dos constituintes sólidos e reduzindo a água introduzida de 1000 ml para 950 ml. Assim, foi obtida uma redução média do valor de espalhamento da argamassa L3-2 (a argamassa de substituição de L3) de 11 mm. A argamassa L3_Mk30 apresentou uma grande disparidade de diâmetros de contorno entre diagonais, pelo que optou-se pela sua replicação com aumento do volume de água introduzido de 20 ml e que se traduziu num aumento do valor de consistência por espalhamento médio de 13 mm, para 139 mm. No caso da argamassa L3_Mk50, obteve-se após amassadura uma argamassa fresca pouco fluida com valores baixos de espalhamento; na sua repetição foram adicionados mais 20 ml face aos 980 ml da primeira amassadura, conseguindo aumentar o valor médio de espalhamento para 144 mm (aumento de 23 mm).

Em suma, para a realização das repetições das amassaduras das argamassas de traço volumétrico 1:3 foram mantidas as dosagens inicias dos componentes sólidos, variando-se apenas a

quantidade de água introduzida na mistura. Porém, para a realização das argamassas de substituição com traço volumétrico 1:1 (L1-2 e L1_Mk30-2) houve alteração das quantidades doseadas na primeira fase de amassaduras.

No caso da argamassa L1 a causa da repetição deveu-se aos baixos valores de espalhamento registados. Na sua amassadura, por limitação de capacidade volumétrica da cuba da misturadora, houve necessidade de realizar a amassadura em duas fases. Assim, na formulação da argamassa de substituição L1-2 foram incrementadas em 25 % as quantidades inicialmente estipuladas, ou seja, dos 2926,7 g de mistura a que correspondiam 600 ml de água na amassadura na argamassa L1, passou-se para 3658,4 g de mistura e 750 ml de água de amassadura. Por fim e de forma a produzir uma argamassa fresca mais fluida que L1 e que garantisse o aumento da sua trabalhabilidade, fez-se aumentar o volume de água introduzido de 750 ml para 800 ml.

O volume de argamassa fresca L1-2 produzido não foi suficiente para preencher na totalidade o 3º molde metálico, pelo que foi realizada nova amassadura com metade das quantidades de todos os constituintes.

A repetição da argamassa L1_Mk30 deveu-se à perda de massa no decorrer do processo de amassadura na cuba da misturadora (por esta se encontrar excessivamente preenchida), havendo assim o risco de desacerto das proporções de massa dos constituintes pretendidos. Na formulação da nova amassadura, foi tido em conta a insuficiência de argamassa L1-2 produzida anteriormente com aumento em 25 % da quantidade dos constituintes. Dessa forma, optou-se por incrementar em 30% a massa inicial de 3109,7 g de mistura, às quais correspondiam 750 ml de água de amassadura, para 4042,6 g à qual foram adicionados 950 ml de água durante a amassadura.

A média e o desvio padrão de todas as nove argamassas estudadas neste trabalho são de 138±5mm, situando-se na gama de valores aceitáveis de espalhamento estipulados de 140±10 mm.

4.2.1.1. **Variação do espalhamento devido ao ajuste da relação A/ (L+Mk)**

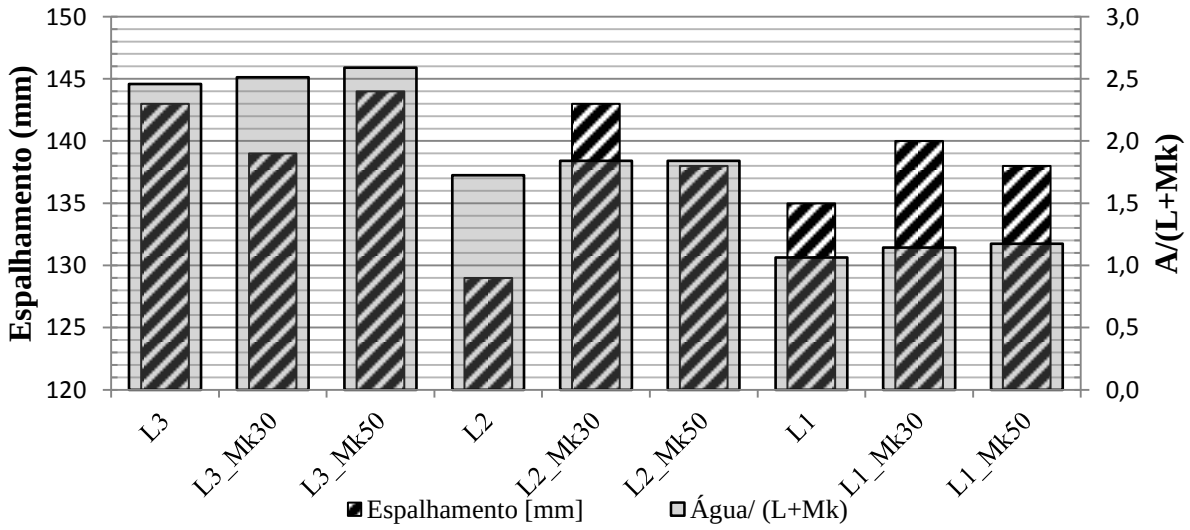

Figura 4.1 - Valores médios de consistência por espalhamento e da relação água/ligante (cal + metacaulino).

A figura 4.1 apresenta os valores médios do ensaio de consistência por espalhamento das argamassas em comparação com a relação água / ligantes.

Com base nos quadros 4.2 e 4.3 verifica-se que para o conjunto de argamassas com traço volumétrico 1:3, a realização de novas amassaduras com um ligeiro acerto da relação A/(L+Mk) conduziu a variações do valor médio de espalhamento de acordo com a variação da referida relação, isto é: para L3, a diminuição do rácio A/(L+Mk) conduziu a um abaixamento significativo do espalhamento; para L3_Mk30 e L3_Mk50 o aumento do rácio traduziu-se no aumento do valor do espalhamento, como espectável. Essa tendência verificou-se igualmente para as novas argamassas de traço volumétrico 1:1, para as quais, o aumento da quantidade de água face à do ligante levou a um aumento do valor médio de espalhamento.

Pela análise do gráfico verifica-se que a adição de metacaulino como substituto parcial da cal aérea induz valores maiores de espalhamento, nomeadamente para o conjunto de argamassas de traço volumétrico 1:1 e 1:2. A variação dos valores de espalhamento é mais demarcada entre as argamassas sem metacaulino (L3, L2, L1).

A relação Água/Ligante é idêntica entre as argamassas com o mesmo traço volumétrico, ocorrendo contudo um ligeiro aumento desse rácio, com o aumento do teor em Mk.

As argamassas de traço volumétrico 1:1 e 1:3 apresentam valores médios de espalhamento próximos entre o conjunto das argamassas, porém as argamassas L3, L3_Mk30 apresentam maior disparidade de valores entre as medições das diagonais, na ordem dos 5 mm, sendo essa disparidade menor no caso das argamassas de traço 1:1 (L1, L1_Mk30 e L1_Mk50),situando-se nos 1-2 mm.

No capítulo seguinte referente à discussão de resultados serão comparadas as variações induzidas pelo acerto da relação A/(L+Mk) sobre os parâmetros sobre os quais esta variação teve maior influencia.

No seguimento deste capítulo serão analisados apenas as argamassas de substituição e aquelas que não requereram substituição; dessa forma, as argamassas com a designação "-2" adotam nas páginas seguintes a designação das argamassas que vieram substituir.

4.3. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

A caracterização das argamassas no estado endurecido permite aferir sobre a evolução das propriedades mais relevantes ao longo do tempo de cura, na procura de avaliar a sua compatibilidade com os suportes e a sua durabilidade.

Esta caracterização foi obtida através dos ensaios de:

- Módulo de elasticidade dinâmico (E_{din});
- Resistências à tração por flexão (R_T) e à compressão (R_C);

- Absorção de água por capilaridade - determinação do Coeficiente de Capilaridade (CC) e do Valor Assimptótico (VA);
- Secagem - determinação do Índice de Secagem (IS) e da Taxa de Secagem (TS);
- Porosidade aberta (Pab);
- Resistência à ação dos sulfatos - variação de massa das argamassas devido à ação dos sulfatos);
- Condutibilidade térmica (λ);
- Difração de raios X (DRX), termogravimétrico e de diferencial térmico (TG-ADT);

Os valores obtidos nos ensaios resultam da média de 3 provetes por argamassa, exceto o ensaio de condutibilidade térmica para o qual foram usados apenas 2 provetes por argamassa. No caso da determinação do E_{din} e do λ cada provete possibilitou a obtenção de mais do que um valor**.**

4.3.1. MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

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

No quadro 4.4 apresentam-se os valores médios e respetivos desvios-padrão de todas as argamassas caracterizadas. Na figura 4.2 apresentam-se os valores representados no quadro 4.4 dispostos num gráfico de colunas.

Quadro 4.4 - Valores médios e desvio-padrão do Módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) aos 28 e 90 dias

MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO [MPa]									
Argamassa	**L3**	**L3_Mk30**	**L3_Mk50**	**L2**	**L2_Mk30**	**L2_Mk50**	**L1**	**L1_Mk30**	**L1_Mk50**
28 dias	729	4245	6690	1969	6104	9383	1728	10394	11747
Dp	189	95	1022	125	22	265	138	90	308
90 dias	3191	1629	3427	3007	6370	8244	2884	8089	10193
Dp	109	100	314	490	357	1597	150	242	532

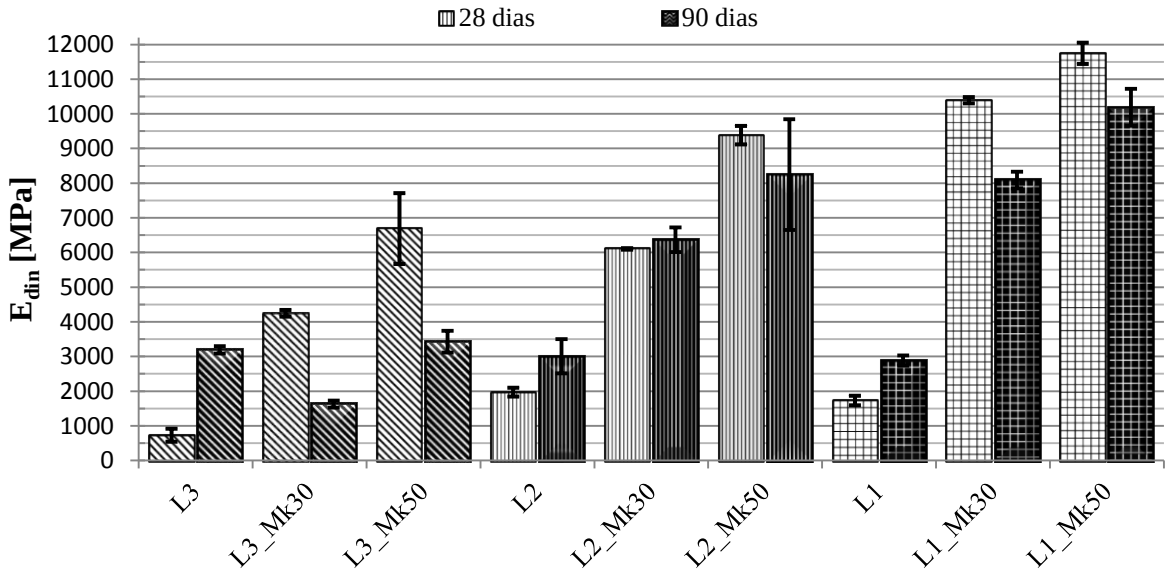

Figura 4.2 - Comparação entre os valores de E_{din} aos 28 e 90 dias para o conjunto de todas as argamassas.

Pela análise do gráfico 4.2 e/ou do quadro 4.4 constata-se que o valor máximo obtido verificou-se para L1_Mk50 aos 28 dias. Do conjunto das argamassas estudadas destacam-se as argamassas com maior traço volumétrico (1:1 e 1:2) como as que apresentam a maior rigidez, porém essa situação verifica-se apenas para argamassas com metacaulino. De facto a diferença de valores entre as argamassas com e sem metacaulino é tanto maior quanto mais forte em ligante for o traço.

A variação do E_{din} que ocorre entre os 28 e os 90 dias de ensaio é maior (a nível percentual) nas argamassas de traço volumétrico 1:3 (L3_Mk30 e L3_Mk50) do que nas argamassas com metacaulino de traço volumétrico 1:2 e 1:1.

O valor mínimo absoluto registado deu-se para L3 aos 28 dias; porém aos 90 dias esta argamassa apresenta já rigidez superior a L3_Mk30.

Nas argamassas sem metacaulino verifica-se um aumento do E_{din} dos 28 para os 90 dias, enquanto nas argamassas com metacaulino ocorre, em geral, diminuição desta característica. Dentro do conjunto das argamassas com metacaulino, a argamassa L2_Mk30 é a única cuja rigidez dos 28 para os 90 dias aumentou.

Os resultados de E_{din} obtidos por provete são apresentados no anexo III.

4.3.1.1. **Influência do traço volumétrico**

Nesta secção analisa-se o desenvolvimento do módulo de elasticidade dinâmico nas argamassas sem adição de metacaulino da figura 4.2.

A visualização gráfica dos resultados indica uma tendência clara de aumento dos valores de E_{din} das argamassas sem metacaulino dos 28 para os 90 dias.

Aos 90 dias, o aumento da concentração do ligante nas argamassas sem adição de metacaulino não aparenta afetar os valores do módulo de elasticidade dinâmico, havendo inclusive um ligeiro decréscimo da rigidez com o aumento do traço: 100-200 MPa tanto entre L3 e L2 como entre L2 e L1. Ocorre igualmente um decréscimo de rigidez aos 28 dias entre L2 e L1. A tendência de evolução do Módulo de elasticidade dinâmico de L2 e L1 não se verifica para L3; este facto será analisado no capítulo referente à discussão de resultados, recorrendo aos resultados de ensaios complementares.

As argamassas com adição de metacaulino (fig. 4.2) apresentam uma tendência de evolução de E_{din} inversa à registada pelas argamassas sem Mk, ou seja, à exceção da argamassa L2_Mk30 todas as argamassas diminuíram o valor de E_{din} dos 28 para os 90 dias, sendo essa evolução mais significativa para as argamassas de traço volumétrico 1:3 (fig. 4.2). A explicação para esta situação vai ser igualmente abordada na discussão de resultados, com base em ensaios complementares realizados.

A análise da figura 4.2 revela igualmente que as argamassas que apresentam um maior ganho de deformabilidade entre as duas idades de ensaio são as argamassas com traço volumétrico mais fraco em ligante e com substituição de massa de cal por Mk - L3_Mk30 e L3_Mk50. Esta situação será abordada no capítulo referente à discussão de resultados.

A argamassa L2_Mk30 apresenta um ligeiro aumento de E_{din} dos 28 para os 90 dias.

O aumento da deformabilidade, induzida às argamassas pela substituição parcial de 50% da massa de cal aérea por metacaulino, em comparação com as argamassas com apenas 30% de substituição de massa é mais significativo nas argamassas de traço 1:3 e 1:2 do que nas argamassas com traço mais forte em ligante.

4.3.1.2. **Influência do aumento do teor em metacaulino por substituição da massa de cal aérea**

A análise comparativa entre as argamassas de traço 1:3 (figura 4.2) revela que, aos 28 dias, o aumento do teor em Mk permite o desenvolvimento de valores superiores de E_{din}. Essa tendência não se vislumbra porém aos 90 dias, verificando-se inclusive uma perda acentuada de rigidez entre a argamassa L3 e L3_Mk30 dos 28 para os 90 dias.

Na quantificação da progressão da rigidez entre idades de ensaio, é notória a diminuição significativa de E_{din} nas argamassas L3_Mk30 e L3_Mk50.

Na análise dos valores de E_{din} registados para o conjunto das argamassas de traço 1:2 (fig. 4.2) denota-se, isoladamente para cada idade, uma evolução de resistência regular de L2 para L2_Mk30 e de L2_Mk30 para L2_Mk50 respetivamente. Em contraponto, no conjunto das argamassas de traço 1:1 fig. 4.2) essa evolução não apresenta regularidade, ou seja, a argamassa L1_Mk30 apresenta um aumento dos valores de E_{din} aos 28 dias de ~500% comparativamente a L1 e de ~200% aos 90 dias, enquanto o aumento registado entre L1_Mk30 e L1_Mk50 foi apenas de 13% aos 28 dias e 26% aos 90 dias.

A maior disparidade de valores verificada entre argamassas com o mesmo teor em ligante ocorre para as argamassas L2_Mk30 e L1_Mk30.

4.3.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO

No quadro 4.5 apresentam-se os valores médios de resistência à tração por flexão e respetivos desvios-padrão de todas as argamassas caracterizadas.

Quadro 4.5 - Valores médios e desvio-padrão de Resistência à tração por flexão aos 28 e 90 dias.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO [MPa]									
Argamassa	**L3**	**L3_Mk30**	**L3_Mk50**	**L2**	**L2_Mk30**	**L2_Mk50**	**L1**	**L1_Mk30**	**L1_Mk50**
28 dias	0,08	0,59	1,09	0,18	0,67	1,13	0,30	2,07	1,78
Dp	0,01	0,03	0,02	0,01	0,09	0,08	0,06	0,24	0,35
90 dias	0,24	0,16	0,58	0,36	0,65	1,43	0,44	1,33	2,62
Dp	0,09	0,02	0,08	0,03	0,04	0,06	0,04	0,19	0,09

Na figura 4.3 estão representados graficamente os valores médios de R_T e desvios-padrão aos 28 e 90 dias das argamassas estudadas neste trabalho.

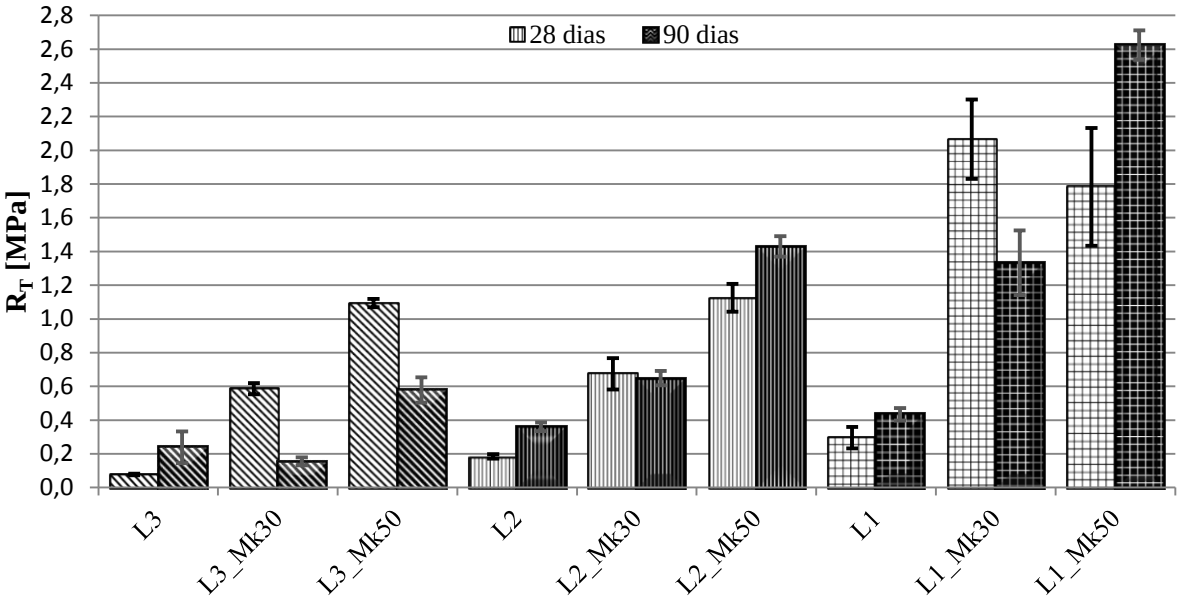

Figura 4.3 - Comparação entre os valores de R_T aos 28 e 90 dias para o conjunto de todas as argamassas.

A argamassa que apresenta o valor mais baixo absoluto de resistência à tração por flexão é L3 aos 28 dias, sendo L1_Mk50 aos 90 dias a argamassa que registou o maior valor absoluto de R_T.

A comparação gráfica entre valores revela que as resistências à tração aos 28 dias apresentam um aumento regular entre argamassas do mesmo traço, exceto a argamassa L1_Mk30 que a esta idade apresenta o maior valor de R_T entre todas as argamassas estudadas, superiorizando-se a L1_Mk50.

A regularidade de aumento de R_T apresentada aos 28 dias entre argamassas do mesmo traço volumétrico verifica-se também aos 90 dias, à exceção da L3_Mk30 que, para esta idade, tem uma R_T inferior à argamassa sem adição de metacaulino de traço 1:3 – L3.

Verifica-se um ligeiro aumento das resistências mecânicas dos 28 para os 90 dias no conjunto de argamassas sem Mk. Estas argamassas apresentam valores baixos de resistência para ambas as idades comparativamente com argamassas com substituição parcial de cal aérea por Mk. A exceção verifica-se para a argamassa L3_Mk30 que, aos 90 dias, apresenta o valor mais baixo de R_T.

Nas argamassas com Mk verifica-se uma tendência de redução dos valores de resistência à flexão dos 28 para os 90 dias. A argamassa L2_Mk30, à imagem do que se verificou para E_{din}, apresenta pouca variação de resistência à tração por flexão entre as duas idades de ensaio.

Os resultados de R_T dados por provete são apresentados no anexo III.

4.3.2.1. **Influência do traço volumétrico**

Pela análise ao gráfico da figura 4.3 denota-se que a progressão das resistências dos 28 para os 90 dias é linear, tanto para a comparação entre argamassas com teor crescente de metacaulino, como para a variação de resistências de cada argamassa entre as duas idades.

O aumento do teor em ligante confere para ambas as idades maior resistência à tração por flexão às argamassas.

As argamassas com 50 % de substituição de massa de cal aérea por metacaulino apresentam maior regularidade na evolução de R_T dos 28 para os 90 dias nomeadamente a L2_Mk50 e L1_Mk50.

Por seu turno, as argamassas de traço volumétrico 1:3 (L3_Mk30 e L3_Mk50) apresentam menor resistência à tração aos 90 dias do que aos 28 dias.

No que concerne as argamassas com 30% de teor em Mk, o aumento da quantidade de ligante face aos agregados só revela ter um contributo significativo para o incremento de R_T, aos 28 dias, no caso da argamassa em que o volume de ligantes e agregados se equivalem, isto é, para L1_Mk30. De facto a R_T aos 28 dias de L3_Mk30 e L2_Mk30 são idênticas; porém essa situação não se verifica para aos 90 dias, altura em que se verifica uma acentuada perda de resistência à tração de L3_Mk30.

De resto, aos 90 dias só a R_T de L2_Mk30 não decresceu fortemente face aos 28 dias, situação que será aprofundada no capítulo da discussão de resultados.

4.3.2.2. **Influência do aumento do teor em metacaulino por substituição da massa de cal aérea**

O gráfico da figura 4.3 revela que as argamassas de traço volumétrico 1:3 apresentam, tal como verificado para o Módulo de elasticidade dinâmico, um aumento de resistência dos 28 para os 90 dias da argamassa L3, enquanto L3_Mk30 e L3_Mk50 perdem resistência aos 90 dias. O forte decréscimo da resistência à tração por flexão da argamassa L3_Mk30 dos 28 para os 90 dias é alvo de discussão no capítulo 5.

O efeito da adição do metacaulino por substituição da cal perde-se aos 90 dias uma vez que, para esta idade, a argamassa L3 (só com cal aérea) apresenta resistência à tração superior. O aumento de resistências entre as 3 argamassas é linear aos 28 dias, sendo tanto maior quanto maior o teor de metacaulino da argamassa. O acréscimo de resistência à tração com o envelhecimento é regular nas argamassas de traço volumétrico 1:2 e 1:1, em condições de cura húmida. Esta situação não se verifica para as argamassas L2_Mk30 (valor mantém-se) e L1_Mk30 (forte decréscimo). A evolução das resistências mecânicas destas duas argamassas será alvo de análise no capítulo seguinte, através do cruzamento dos resultados dos ensaios mecânicos com os ensaios químicos e termogravimétricos.

Os teores em metacaulino de referência escolhidos para análise das características das argamassas evidenciam, para o traço volumétrico 1:2, valores bem intercalados, ou seja, com o

aumento do teor em metacaulino, as argamassas desenvolvem resistências mecânicas sucessivamente maiores entre elas.

O crescimento das resistências mecânicas com o aumento do teor em metacaulino é no caso das argamassas de traço volumétrico 1:1 mais acentuado do que para o conjunto das argamassas de traço 1:2, especialmente na comparação de R_T das argamassas com 0% e 30% de metacaulino.

Analisando os valores obtidos para as argamassas de traço volumétrico 1:1 e comparando-os com os das argamassas de traço volumétrico 1:2 denota-se um maior contributo do aumento da dosagem em ligante nas argamassas com metacaulino para o aumento das resistências à tração por flexão, do que o que se verifica para as argamassas sem adição de metacaulino.

4.3.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

No quadro 4.6 apresentam-se os valores médios de Resistência à compressão e respetivos desvios-padrão de todas as argamassas caracterizadas.

Quadro 4.6 - Valores médios e desvios-padrão de Resistência à compressão aos 28 e 90 dias.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO [MPa]									
Argamassa	**L3**	**L3_Mk30**	**L3_Mk50**	**L2**	**L2_Mk30**	**L2_Mk50**	**L1**	**L1_Mk30**	**L1_Mk50**
28 dias	0,13	1,16	2,82	0,30	2,99	6,33	0,45	6,88	13,47
Dp	0,05	0,01	0,31	0,02	0,10	0,30	0,03	0,93	1,70
90 dias	0,41	0,81	1,89	0,62	3,61	7,03	0,68	5,55	15,28
Dp	0,05	0,05	0,59	0,03	0,27	0,63	0,39	3,68	0,25

Na figura 4.4, representa-se graficamente os valores médios e desvios-padrão apresentados no quadro 4.6.

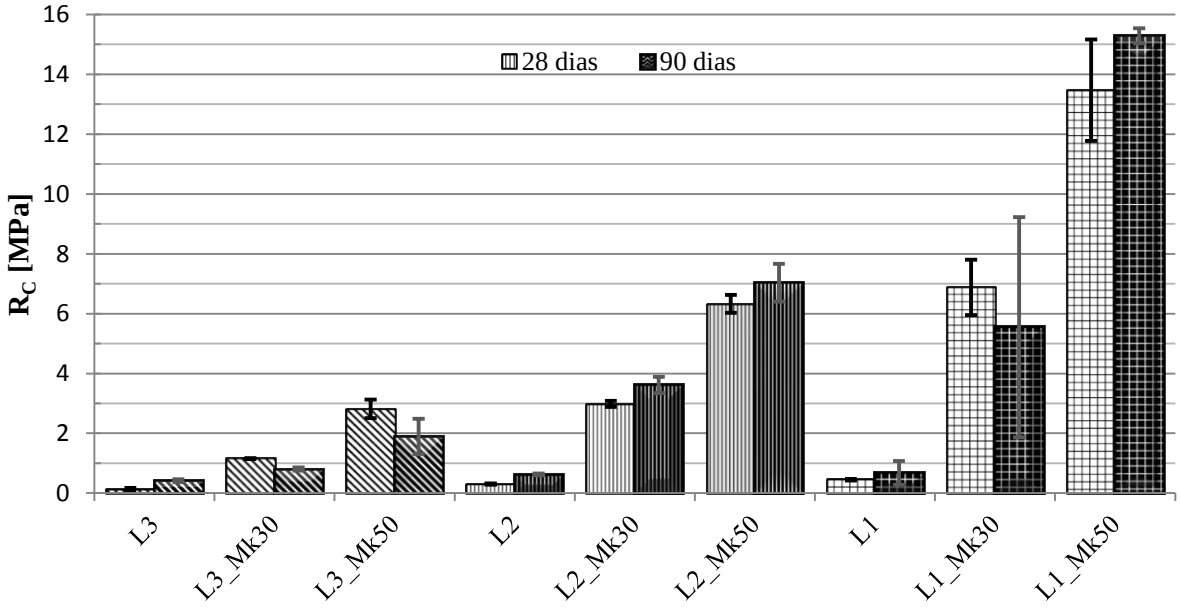

Figura 4.4 - Comparação entre os valores de R_C aos 28 e 90 dias para o conjunto de todas as argamassas.

Pela análise dos resultados expressos na figura 4.4, verifica-se que o aumento da resistência à compressão é progressiva, quer a análise seja feita a nível do aumento do traço volumétrico ou do aumento do teor em metacaulino por substituição de massa de cal aérea. Essa tendência verifica-se seja para o ensaio realizado aos 28 dias, como aos 90 dias.

O aumento das resistências para a mesma idade de ensaio revela uma tendência de progressão tanto mais exponencial quanto maior for a dosagem em ligante da argamassa.

A tendência de desenvolvimento das resistências à compressão dos 28 para os 90 dias está em concordância com as verificadas no ensaio de resistência à flexão.

Os resultados de R_C dados por provete são apresentados no anexo III.

4.3.3.1. **Influência do traço volumétrico**

A figura 4.4 indica uma clara tendência de aumento das resistências à compressão dos 28 para os 90 dias das argamassas sem Mk; esse aumento é progressivamente menor a nível percentual quanto maior for o traço volumétrico da argamassa.

A inexistência de produtos pozolânicos, que conferem propriedades hidráulicas às argamassas, faz com que as resistências sejam baixas às primeiras idades, aumentando porém com a idade dos provetes. Assim, a argamassa que apresenta os menores valores de R_C é L3 tanto aos 28 como aos 90 dias.

A análise das argamassas com substituição de 30 e 50 % da massa de cal aérea por Mk revela uma tendência de aumento das resistências com o aumento da concentração em ligante nas argamassas. Essa análise também se verifica com a evolução no tempo. A adição de metacaulino é responsável pelo acréscimo da resistência aos 28 dias face às argamassas sem metacaulino pelos motivos expressos anteriormente.

O decréscimo de resistências das argamassas L3_Mk30, L3_Mk50 e L1_Mk30 dos 28 para os 90 dias é discutido no capítulo 5.

O aumento de R_C dos 28 para os 90 dias nas restantes argamassas com Mk é pouco acentuado, cifrando-se na ordem dos 10-15 %.

Os valores mais elevados que se registam para estas argamassas são claramente os da L1_Mk50, em ambas as idades de estudo.

4.3.3.2. **Influência do aumento do teor em metacaulino por substituição da massa de cal aérea**

No conjunto das argamassas de traço volumétrico 1:3 verifica-se um aumento regular e efetivo de R_C com o aumento do teor em metacaulino. O aumento é consistente seja para os 28 dias como para os 90 dias.

A perda de resistência à compressão dos 28 para os 90 dias é tanto maior quanto maior é o teor em pozolana da argamassa, esta situação virá justificada no capítulo 5.

O aumento da resistência à compressão dos 28 para os 90 dias é consideravelmente superior, a nível percentual, na argamassa L2 – sem metacaulino - do que nas argamassas com metacaulino - L2_Mk30 e L2_Mk50.

Comparativamente com o que se verifica para as argamassas de traço volumétrico 1:3, o acréscimo de resistência conferido pela inclusão de metacaulino nas argamassas é mais efetivo para as argamassas de traço 1:2, nomeadamente na comparação entre argamassas sem Mk e com 30% de Mk. O aumento registado de L2 para L2_Mk30 é 10 vezes superior aos 28 dias e 6 vezes aos 90 dias. No caso do aumento verificado entre L3 e L3_Mk30, este é 9 vezes superior aos 28 dias e apenas 2 vezes maior aos 90 dias.

No caso de traço volumétrico 1:1, verifica-se um aumento acentuado das resistências com o aumento do teor em metacaulino. Apesar do desenvolvimento registar-se para ambas as idades analisadas isoladamente, a evolução por ação do envelhecimento para cada uma das argamassas singularmente é ambígua; no caso da argamassa L1_Mk30 diminui enquanto para L1 e L1_Mk50 as resistências à compressão aumentam. O motivo da diferença a nível evolutivo que se verifica para as argamassas deste traço será discutido no capítulo 5.

4.3.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio permite traçar as curvas de absorção de água por capilaridade, a partir das quais é possível determinar o Coeficiente de Capilaridade (CC) de cada provete de argamassa, pelo declive do troço inicial das curvas, e o Valor Assimptótico (VA), valor de absorção capilar obtido no patamar de saturação (troço horizontal do gráfico). Este ensaio tem significativa importância para a avaliação do comportamento das argamassas face à ação da água da chuva e aos ciclos gelo-degelo.

Na fig. 4.5 são apresentadas as médias das curvas de absorção capilar aos 28 dias de idade das nove argamassas.

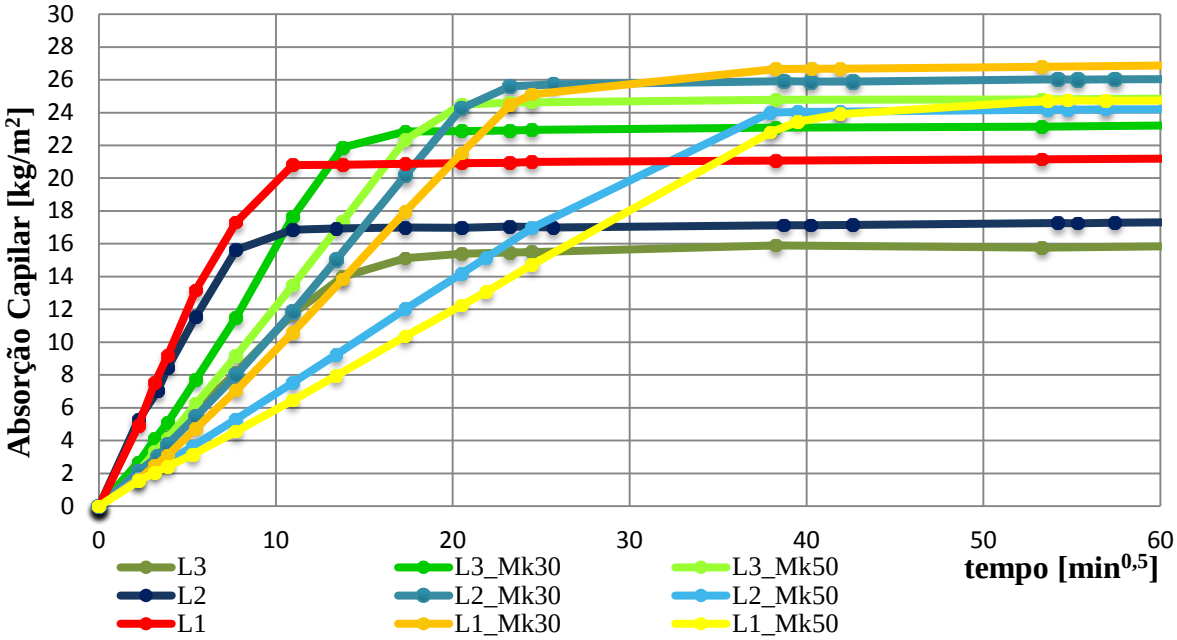

Figura 4.5 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias de todas as argamassas, sem impermeabilização lateral.

Na figura 4.6 são representadas graficamente as médias das curvas de absorção capilar aos 90 dias de idade.

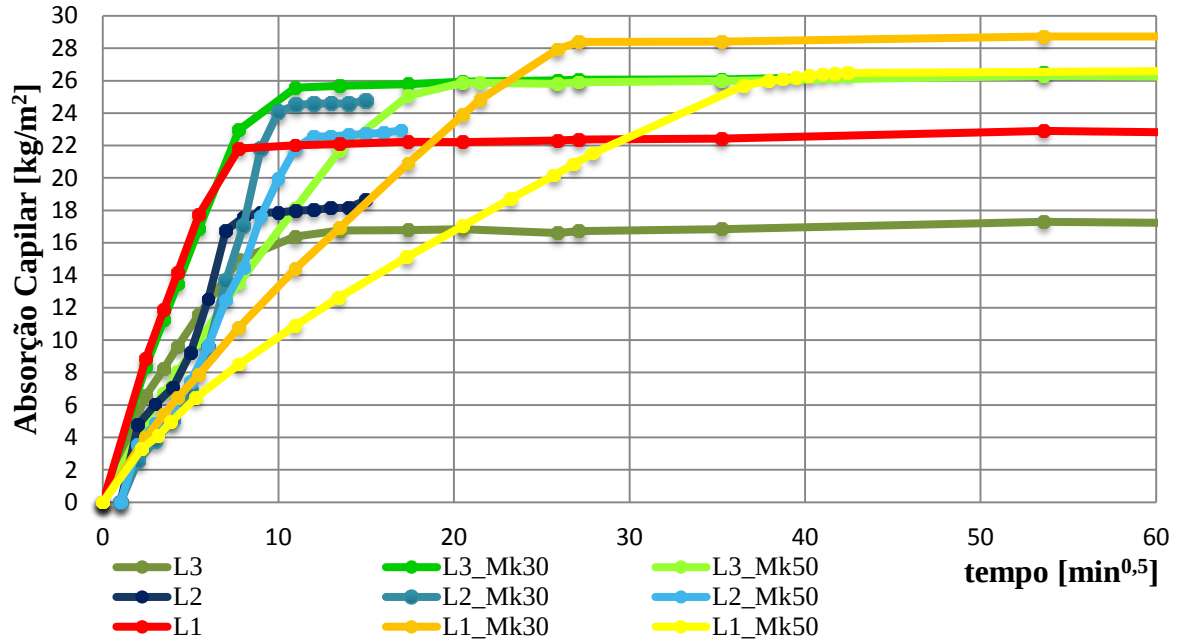

Figura 4.6 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 90 dias de todas as argamassas, com impermeabilização lateral.

A visualização gráfica das curvas de absorção capilar da figura 4.5 indica que a argamassa que apresenta a velocidade mais elevada de absorção capilar (CC) é L1. Por seu turno, L1_Mk50 apresenta aos 28 dias o CC mais baixo.

No que concerne a absorção máxima de água por capilaridade, aquela que regista o valor mais elevado é a argamassa L1_Mk30, sendo o mais baixo, o registado por L3 (fig. 4.5).

É percetível que as argamassas sem adição de metacaulino foram aquelas que, aos 28 dias, apresentaram as menores quantidades de massa de água absorvidas por unidade de área.

Através da visualização da fase inicial das curvas da figura 4.5 é visível que L1_Mk50 apresenta o menor valor de CC e L1 o maior, sendo porém semelhante ao CC de L2 aos 28 dias.

A análise da figura permite ainda identificar as argamassas que atingem mais rapidamente o patamar de saturação, respetivamente, L2, L1 e L3_Mk30, sendo igualmente as argamassas com os CC mais elevados.

Aos 90 dias de idade (fig. 4.6), a argamassa L1 é igualmente a argamassa com o valor mais elevado de CC (agora com valor idêntico a argamassa L3_Mk30) e L1_Mk50 é aquela que apresenta a menor velocidade de absorção capilar. A mesma situação mantém-se quanto à análise do volume total de água absorvida, ou seja, L1_Mk30 continua aos 90 dias de idade a apresentar o valor mais elevado, enquanto L3 é argamassa que menor volume de água absorveu por unidade de superfície.

A análise da figura revela ainda que aos 90 dias a argamassa que apresenta o menor CC é L1_Mk50 tal como se tinha verificado para o ensaio aos 28 dias e que a argamassa L1 é aquela que apresenta o maior.

Tal como para a figura 4.5 é possível identificar as 3 argamassas que atingem o patamar de saturação mais rapidamente, sendo elas respetivamente: L1, L3_Mk30 e L3. No seguimento do verificado para os 28 dias, também aos 90 dias estas são as argamassas com os valores de CC mais elevados. Assim como foi previamente referido, a argamassa L2 foi a única argamassa que diminuiu o valor CC dos 28 para os 90 dias.

No quadro 4.7 são expressos os valores médios e respetivos desvios-padrão dos Coeficientes de Capilaridade e Valores Assimptóticos aos 28 dias e 90 dias de todas as argamassas.

Quadro 4.7 - Valores médios e desvios-padrão dos Valores Assimptóticos e Coeficientes de Capilaridade de todas as argamassas aos 28 e 90 dias.

COEFICIENTE DE CAPILARIDADE [kg/m^2.min^{0,5}]									
Argamassa	**L3**	**L3_Mk30**	**L3_Mk50**	**L2**	**L2_Mk30**	**L2_Mk50**	**L1**	**L1_Mk30**	**L1_Mk50**
28 dias	0,84	1,20	1,06	1,40	0,91	0,51	1,48	0,73	0,37
Dp	0,10	0,07	0,14	0,24	0,02	0,01	0,14	0,03	0,04
90 dias	1,14	1,61	1,15	1,04	0,94	0,82	1,77	0,92	0,70
Dp	0,04	0,08	0,14	0,21	0,07	0,16	0,16	0,02	0,11
VALOR ASSIMPTÓTICO [kg/m^2]									
Argamassa	**L3**	**L3_Mk30**	**L3_Mk50**	**L2**	**L2_Mk30**	**L2_Mk50**	**L1**	**L1_Mk30**	**L1_Mk50**
28 dias	15,8	23,1	24,8	17,3	26,1	24,2	21,1	27,0	24,8
Dp	0,4	2,1	1,9	0,2	1,1	0,5	0,4	2,1	0,4
90 dias	17,8	26,8	26,5	18,6	24,8	22,9	23,0	28,8	26,7
Dp	0,5	1,0	0,7	0,9	0,5	1,3	0,9	0,8	0,3

Na figura 4.7 analisa-se num gráfico de colunas os valores médios dos Coeficientes de Capilaridade e dos Valores Assimptóticos e respetivos desvios-padrão aos 28 dias e 90 dias de todas as argamassas.

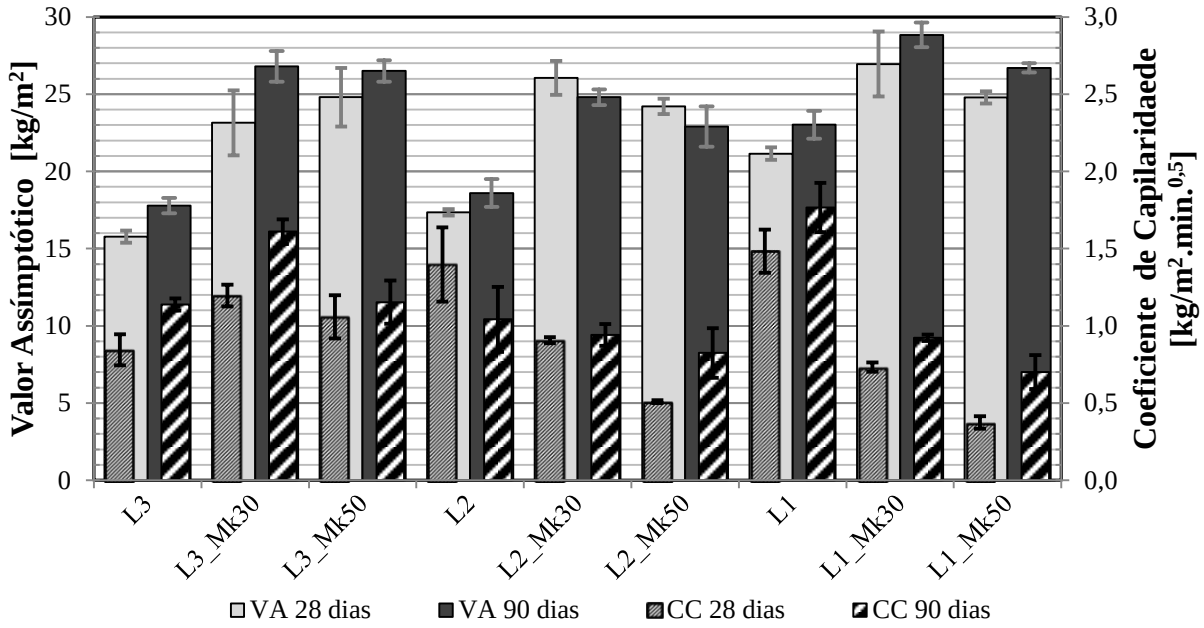

Figura 4.7 - Comparação aos 28 e 90 dias dos Valores Assimptóticos e dos Coeficientes de Capilaridade de todas as argamassas.

A análise dos valores expressos no quadro 4.7 complementados com a evolução gráfico dos valores dos 28 para os 90 dias apresentados na figura 4.7 demonstra que à exceção da argamassa L2, o Coeficiente de Capilaridade aumentou dos 28 dias para os 90 dias de idade.

Em relação ao Valor Assimptótico ocorreu um aumento entre as 2 idades de ensaio para todas as argamassas à exceção de L2_Mk30 e L2_Mk50 cujos valores diminuíram dos 28 para os 90 dias.

Não é possível estabelecer uma proporção direta entre os 2 parâmetros, porém para as argamassas de traço volumétrico 1:3 e 1:1 o aumento de Coeficiente de Capilaridade dos 28 dias para os 90 dias é acompanhado por um aumento do Valor Assimptótico.

Todas as argamassas com metacaulino aumentaram o CC dos 28 para os 90 dias, enquanto todas as argamassas sem metacaulino aumentaram o VA dos 28 para os 90 dias.

Aumento do VA dos 28 para 90 dias para todas as argamassas à exceção de L2_Mk30 e L2_Mk50 cujos valores diminuíram.

As argamassas sem metacaulino apresentaram os Valores Assimptóticos absolutos mais baixos para as 2 idades numa ótica de análise por traço volumétrico. Os maiores valores absolutos verificam-se por ordem crescente de valor para as argamassas: L3_Mk50, L1_Mk50, L3_Mk30 e L1_Mk30.

No sentido de analisar o efeito que a condição de cura húmida induziu na estrutura porosa dos meios provetes no período compreendido entre os 28 dias e os 90 dias, apresentam-se a seguir as

curvas de absorção capilar das argamassas segundo o traço volumétrico e posteriormente segundo o teor de massa de metacaulino.

4.3.4.1. **Influência do traço volumétrico**

Na figura 4.8 são representadas as curvas de absorção capilar das argamassas só de cal aérea.

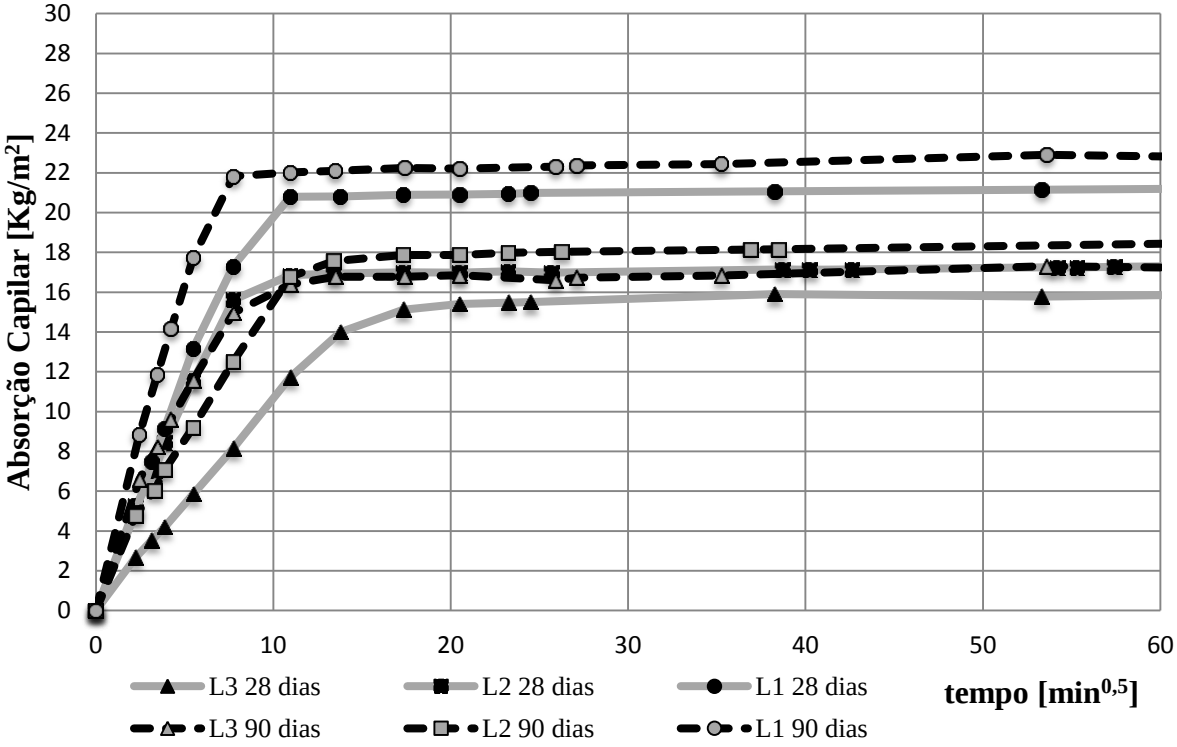

Figura 4.8 - Evolução das curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas sem Mk.

A análise das figuras 4.5 e 4.6 indica que as argamassas sem metacaulino são para ambas as idades de ensaio, aquelas que apresentaram os VA mais baixos entre todas as argamassas.

Pela análise da figura 4.8 verifica-se um aumento da quantidade total de água absorvida por capilaridade dos 28 para os 90 dias na ordem de 1 kg/m^2 por argamassa. O aumento foi verificado para as 3 argamassas.

O aumento revelado pelo Valor Assimptótico é acompanhado pelo aumento do Coeficiente de Capilaridade dos 28 para os 90 dias de idade para as argamassas L3, a qual demonstra o aumento mais pronunciado, e para a L1. A velocidade de absorção capilar decresceu na argamassa L2 entre o período de estudo considerado. O gráfico indica ainda que, à exceção da curva da argamassa L1 aos 28 dias, existe uma proporção entre o CC e o período de tempo ao fim do qual as argamassas atingem o patamar de saturação.

Na figura 4.9 estão representadas as curvas de absorção capilar das argamassas com 30% de substituição de massa de cal aérea por metacaulino.

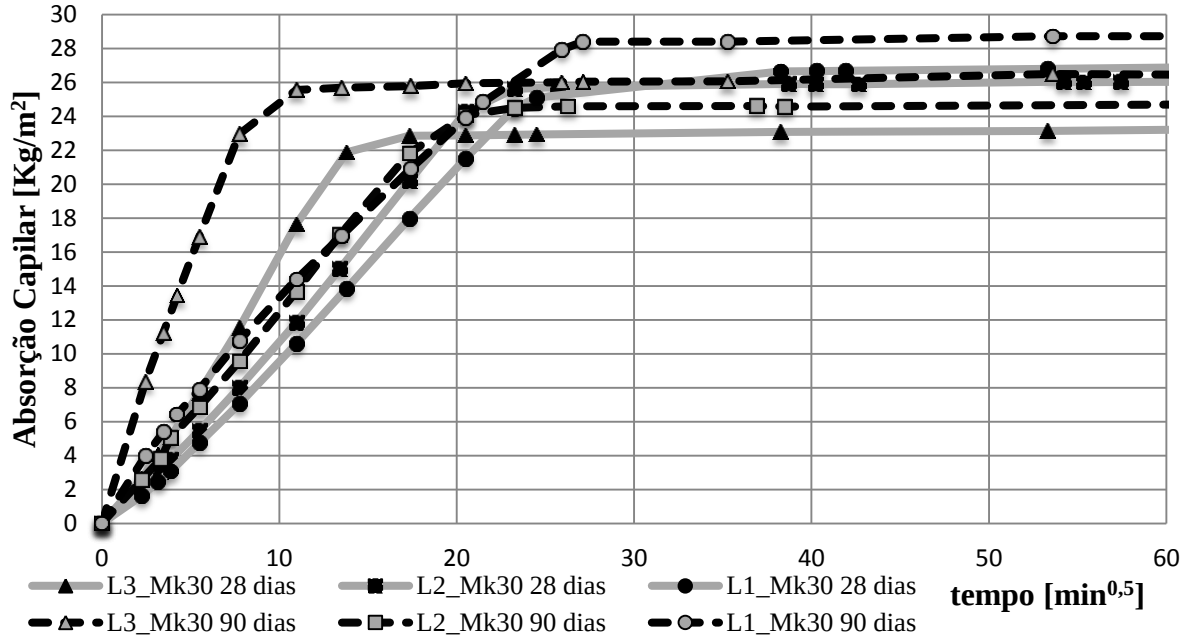

Figura 4.9 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas com 30% de Mk.

Na análise à figura 4.9, destaca-se a argamassa L3_Mk30 com os maiores coeficientes de capilaridade, aos 28 e aos 90 dias de ensaio, sendo o valor superior aos 90 dias. Esta argamassa apresenta igualmente um menor período de tempo necessário para atingir o VA.

Os valores do Coeficiente de Capilaridade das restantes argamassas são equivalentes, ocorrendo porém um acréscimo deste coeficiente dos 28 dias para os 90 dias, nomeadamente para a argamassa L1_Mk30.

Quanto aos Valores Assimptóticos, o menor valor regista-se para L3_Mk30 aos 28 dias e o maior para a argamassa L1_Mk30 aos 90 dias, que é também a argamassa que demorou mais tempo para atingir o patamar referente à saturação média dos provetes desta argamassa.

Na figura 4.10 representam-se as curvas referentes às argamassas com 50% de MK.

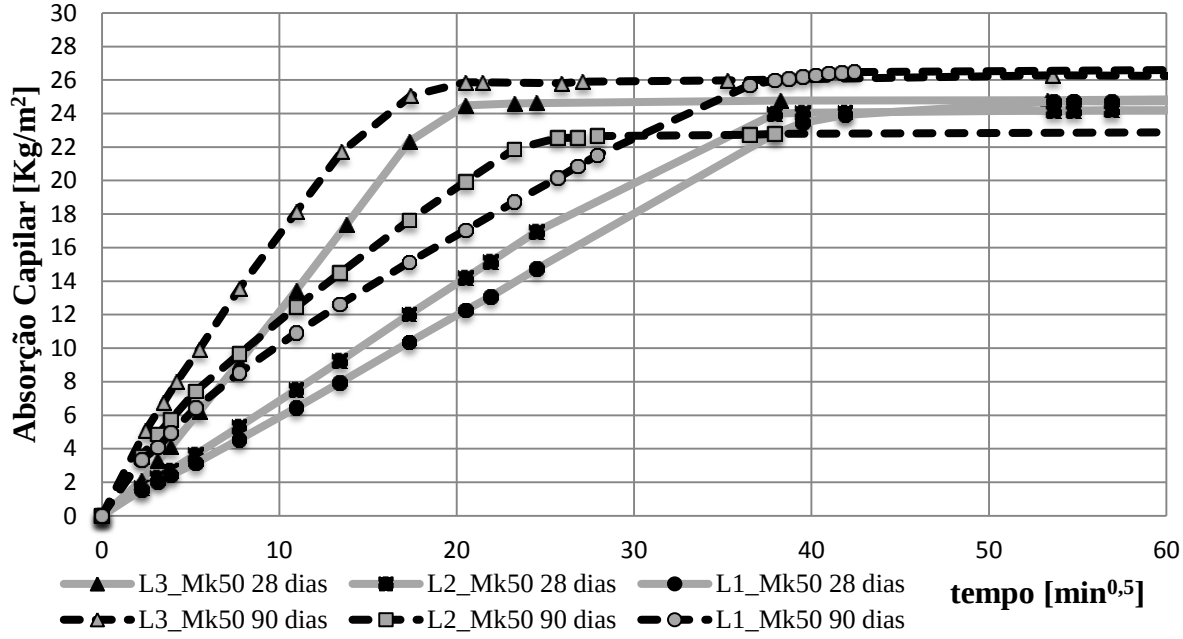

Figura 4.10 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas com 50% de Mk.

Tal como se verifica para as argamassas com 30% de substituição de cal aérea por metacaulino, também entre as argamassas em que a substituição foi de 50% de Mk, são as argamassas L3_Mk50 que apresentam os maiores valores de CC, sendo mais uma vez o maior obtido no ensaio aos 90 dias de idade. Ainda no que concerne ao CC, a argamassa com o menor valor é L1_Mk50 aos 28 dias.

É possível estabelecer para este conjunto de argamassas uma relação entre o CC e o tempo decorrido até as argamassas atingirem o patamar de saturação; assim, L3_Mk50 aos 90 dias, argamassa com o maior valor de CC, é igualmente a argamassa que mais rapidamente atinge o patamar de saturação; por seu turno, L1_Mk50 aos 28 dias é a argamassa que apresenta o menor valor de Coeficiente de Capilaridade e a que maior período de tempo demora a atingir o patamar de saturação.

4.3.4.2. **Influência do aumento do teor em metacaulino por substituição da massa de cal aérea**

Nas três figuras seguintes, estudar-se-á a evolução das curvas de absorção capilar às duas idades de ensaio, segundo a influência do teor de metacaulino para cada um dos 3 traços volumétricos considerados nesta dissertação. Assim, na figura 4.11 interpreta-se a sequência de valores de absorção de água por capilaridade das argamassas com traço volumétrico 1:3 aos 28 dias e 90 dias.

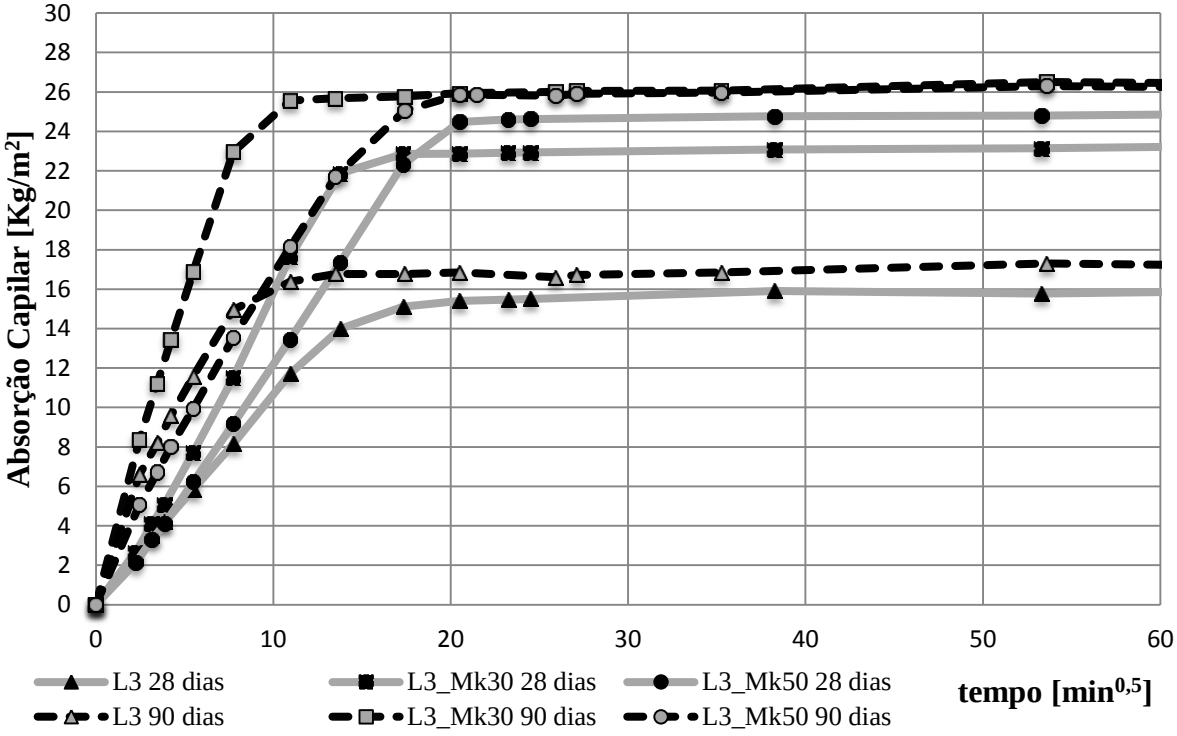

Figura 4.11 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas de traço volumétrico 1:3.

A análise da figura revela uma diferença significativa entre os Valores Assimptóticos da argamassa L3 aos 28 dias e 90 dias face às argamassas com metacaulino. Essa diferença situa-se entre

os 8-10 kg/m^2, sendo os valores de L3 os mais baixos, respetivamente para os 28 e 90 dias, e os superiores pertencentes a L3_Mk30 e L3_Mk50 ambos aos 90 dias de idade.

Além de apresentar um baixo Valor Assimptótico, L3 aos 90 dias é a argamassa que leva menos tempo a atingir o patamar de saturação; em contraponto, os meios provetes de L3_MK50 aos 28 e 90 dias são os que demoram mais tempo para atingirem o referido patamar.

Quanto aos Coeficientes de Capilaridade existe uma maior concordância entre os valores. Assim, as argamassas com uma velocidade mais reduzida de absorção capilar são L3 e L3_Mk50 aos 28 dias, sendo L3_Mk30 aos 90 dias a argamassa que apresenta o CC mais elevado.

Na figura 4.12 estão representadas as curvas de absorção capilar das argamassas de traço volumétrico 1:2 aos 28 dias e 90 dias.

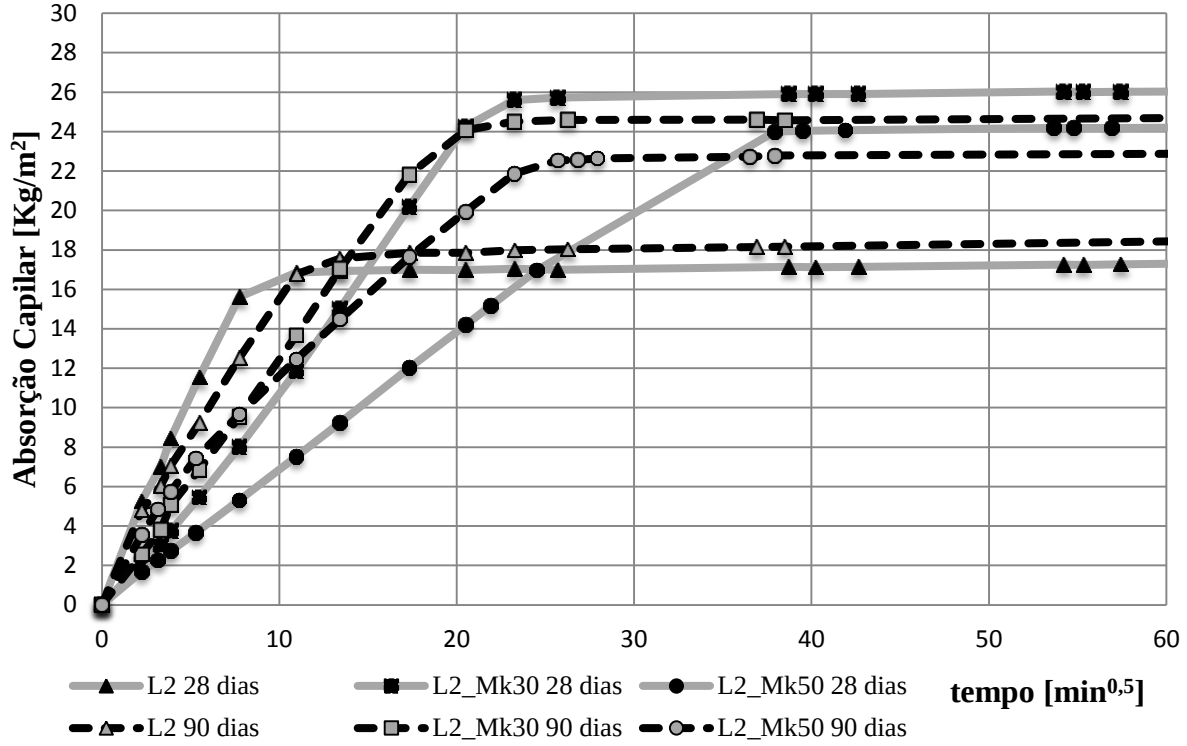

Figura 4.12 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas de traço volumétrico 1:2.

Face ao verificado nas argamassas de traço volumétrico 1:3, as argamassas só com cal aérea como ligante (L2 aos 28 e 90 dias) mantém-se como aquelas que apresentam os mais baixos Valores Assimptóticos, segundo a mesma ordem mas com diferenças para os VA das restantes argamassas mais reduzidas (4 - 8 kg/m^2); L2_Mk30 aos 28 dias a argamassa com o maior valor absoluto deste parâmetro. Porém, L2 aos 28 dias e 90 dias, caracterizam-se respetivamente, como as argamassas com Coeficientes de Capilaridade mais elevados. A argamassa L2 aos 28 dias apresenta ainda o menor período de tempo até atingir o patamar de saturação Por seu turno, a argamassa L2_Mk50 aos 28 dias apresenta o valor mais baixo de CC, sendo também a argamassa que demora mais tempo para atingir o seu patamar de saturação.

Na figura 4.13 apresentam-se as curvas de absorção capilar das argamassas de traço volumétrico 1:1 aos 28 dias e 90 dias.

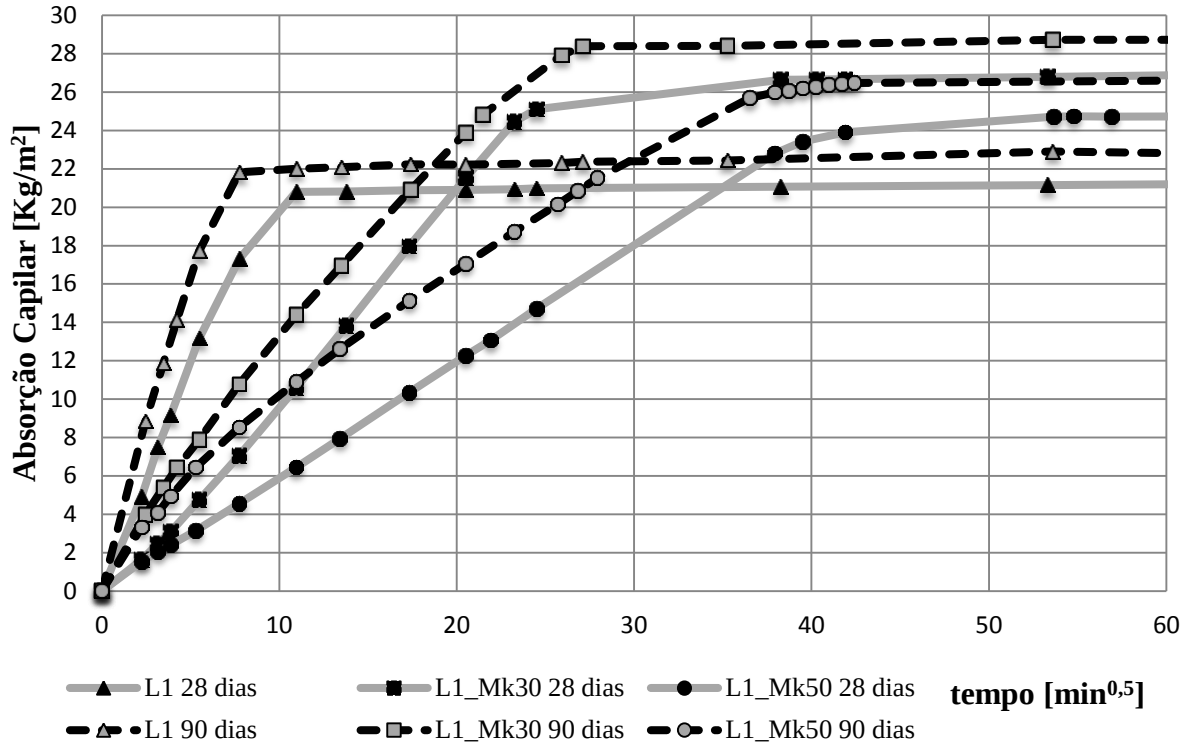

Figura 4.13 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas de traço volumétrico 1:1.

O gráfico da figura assemelha-se ao gráfico anterior referente às argamassas com traço volumétrico 1:2, uma vez que as argamassas sem Mk (L1 aos 28 dias e 90 dias) continuam a apresentar os valores mais elevados de CC e o menor tempo despendido para atingirem o patamar de saturação; porém invertem a ordem entre elas. Em sentido inverso, as argamassas L1_Mk50 são, respetivamente para os 28 dias e 90 dias, as argamassas com menor Coeficiente de Capilaridade e que mais tempo demoram a atingir o patamar de saturação.

Em relação ao valor máximo de água absorvida por capilaridade, L1 aos 28 dias apresenta o VA mais baixo e L1_Mk30 aos 90 dias, o mais elevado.

4.3.5. ENSAIO DE SECAGEM

Nas figuras 4.14 e 4.15 estão expostas as médias das curvas de evaporação de todas as argamassas aos, respetivamente, 28 e 90 dias de idade.

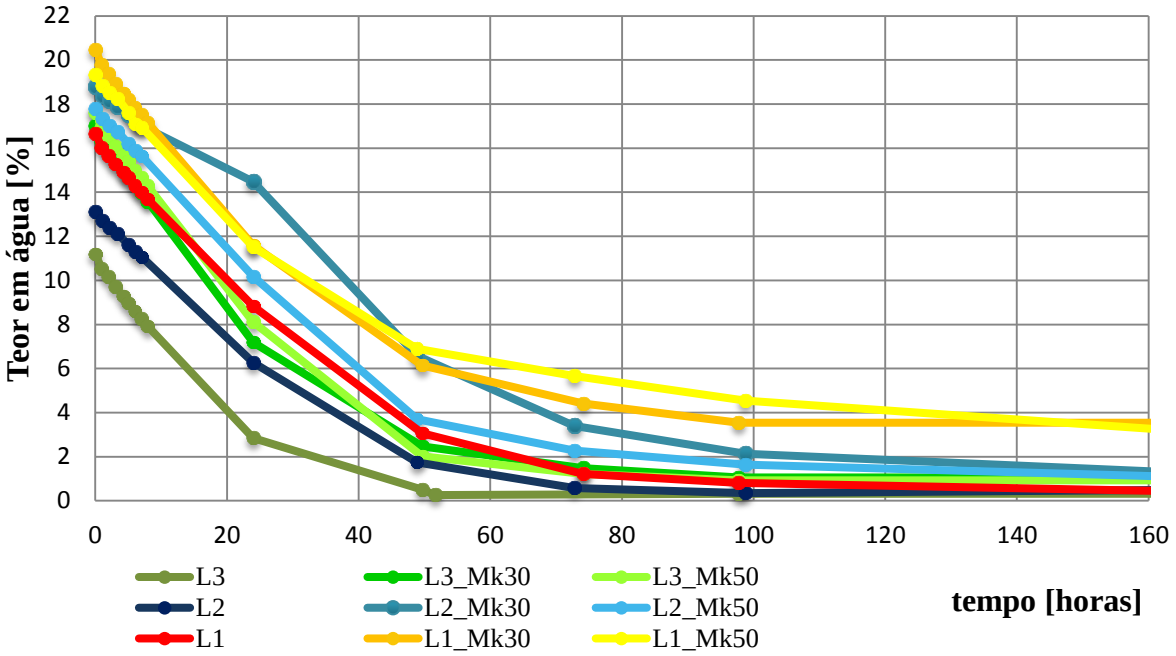

Figura 4.14 - Curvas de evaporação das argamassas aos 28 dias de todas as argamassas, sem impermeabilização lateral.

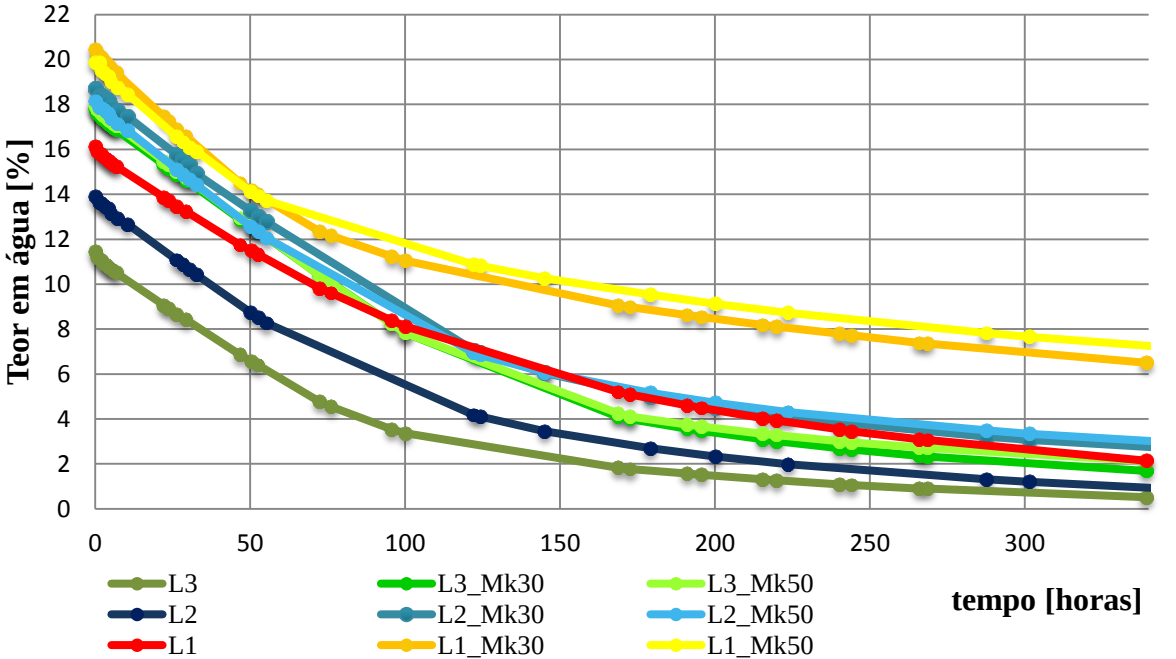

Figura 4.15 - Curvas de evaporação das argamassas aos 90 dias de todas as argamassas, com impermeabilização lateral.

O processo de secagem foi, aos 90 dias, mais moroso que aos 28 dias de ensaio, devido à impermeabilização lateral dos provetes. Este facto inviabiliza a comparação direta entre as 2 idades de ensaio, sendo possível porém a analise entre as argamassas à mesma idade.

Tal como descrito no subcapítulo 3.3.5 a interpretação dos resultados do ensaio permite obter o Índice de Secagem (IS) e a Taxa de Secagem (TS) para cada argamassa.

Dessa forma, são apresentados no quadro abaixo os valores médios e desvios-padrão destes 2 parâmetros aos 28 e 90 dias.

Quadro 4.8 - Valores médios e desvio-padrão do Índice e Taxa de Secagem das argamassas aos 28 e 90 dias.

ÍNDICE DE SECAGEM [-]									
Argamassa	**L3**	**L3_Mk30**	**L3_Mk50**	**L2**	**L2_Mk30**	**L2_Mk50**	**L1**	**L1_Mk30**	**L1_Mk50**
28 dias	0,36	0,29	0,29	0,29	0,30	0,36	0,33	0,42	0,35
Dp	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
90 dias	0,27	0,35	0,36	0,22	0,30	0,31	0,40	0,50	0,47
Dp	0,02	0,01	0,03	0,00	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02

TAXA DE SECAGEM [kg/m^2.h]									
Argamassa	**L3**	**L3_Mk30**	**L3_Mk50**	**L2**	**L2_Mk30**	**L2_Mk50**	**L1**	**L1_Mk30**	**L1_Mk50**
28 dias	0,44	0,46	0,45	0,29	0,24	0,30	0,41	0,46	0,32
Dp	0,04	0,02	0,04	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,02
90 dias	0,16	0,16	0,14	0,13	0,12	0,13	0,15	0,17	0,16
Dp	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03

Na figura 4.16 são apresentados os valores do Índice de Secagem e Taxa de Secagem aos 28 dias de todas as argamassas.

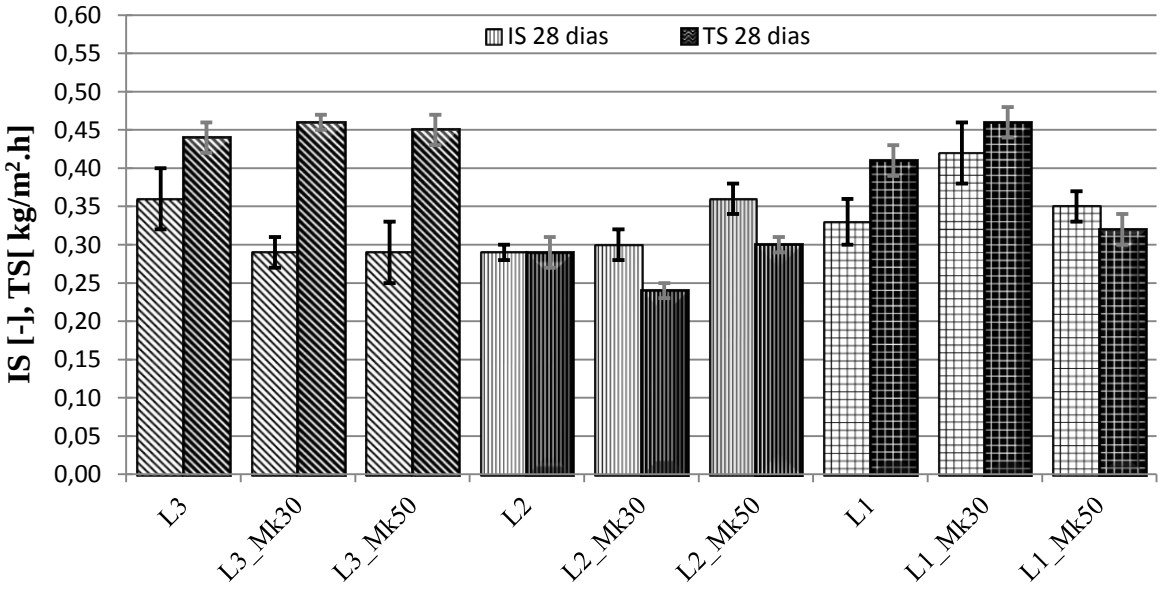

Figura 4.16 - Índice de Secagem e Taxa de Secagem aos 28 dias de todas as argamassas.

A análise do gráfico 4.16 indica uma variação de valores do Índice de Secagem entre argamassas pouco regular aos 28 dias de ensaio, tanto a comparação seja feita segundo a influência do traço volumétrico, quer segundo a influência do teor em metacaulino. Os valores mais baixos e que indicam uma maior facilidade de evaporação de água do interior dos provetes, registam-se respetivamente para as argamassas L2, L3_Mk30 e L3_Mk50.

A Taxa de Secagem permite aferir a velocidade de secagem inicial média das argamassas; assim, quanto maior for a Taxa de Secagem, maior será a velocidade inicial de evaporação de água do interior dos meios provetes analisados. As argamassas de traço volumétrico 1:3 revelam ser aquelas que apresentam maior facilidade de evaporação de água inicial.

A argamassa L1_Mk30 apresenta simultaneamente um elevado valor de IS e TS, pois apesar da velocidade de evaporação inicial ser elevada, os provetes desta argamassa apresentam, após o período inicial, grande dificuldade na remoção de água.

Na figura 4.17 são apresentados os valores do Índice de Secagem e Taxa de Secagem aos 90 dias de todas as argamassas.

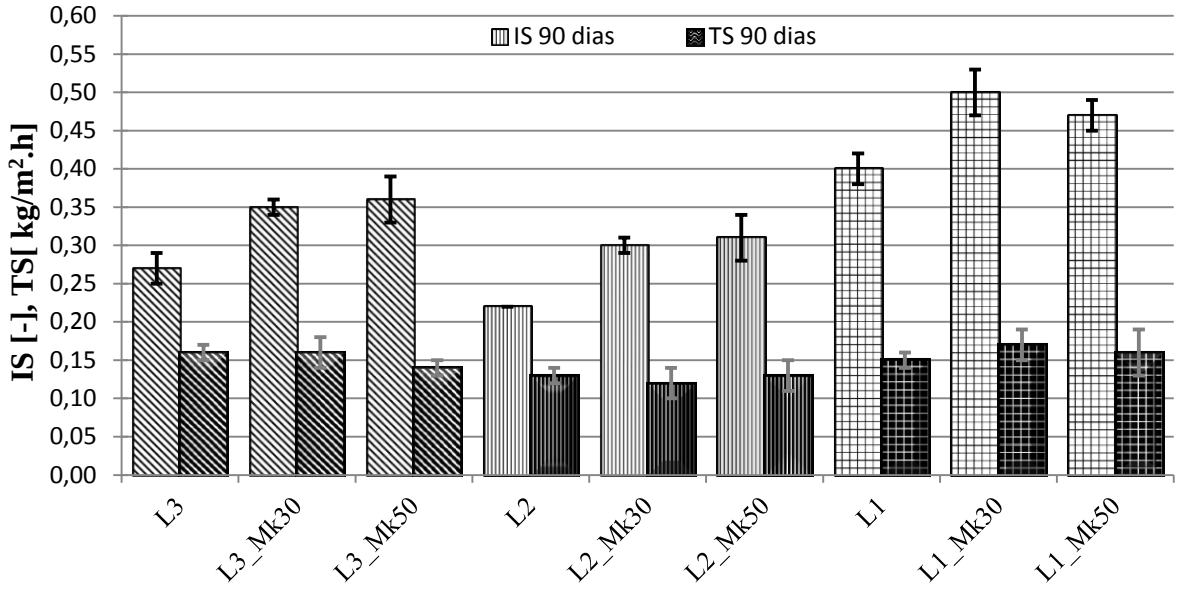

Figura 4.17 - Índice de Secagem e Taxa de Secagem aos 90 dias de todas as argamassas.

O gráfico 4.17 indica que os valores do Índice de Secagem aos 90 dias são progressivamente mais elevados com o aumento do teor em metacaulino e com o aumento do teor global em ligante. Este facto revela uma maior facilidade de evaporação de água, para o total do ensaio das argamassas sem Mk.

Os valores da Taxa de Secagem reduzem substancialmente dos 28 para os 90 dias. Este facto está intrinsecamente ligado à restrição lateral do fluxo de secagem imposta pela película aderente adotada no ensaio dos 90 dias e mencionada anteriormente.

As argamassas que revelam maior velocidade de secagem inicial são, para ambas as idades de estudo as argamassas de traço volumétrico 1:3 e 1:1, nomeadamente a argamassa com L3 e L1_Mk30. A argamassa L2_Mk30 revela maior dificuldade de evaporação inicial face às restantes argamassas.

4.3.5.1. **Influência do traço volumétrico**

Na figura 4.18 estão representadas as curvas de secagem das argamassas só de cal aérea como ligante.

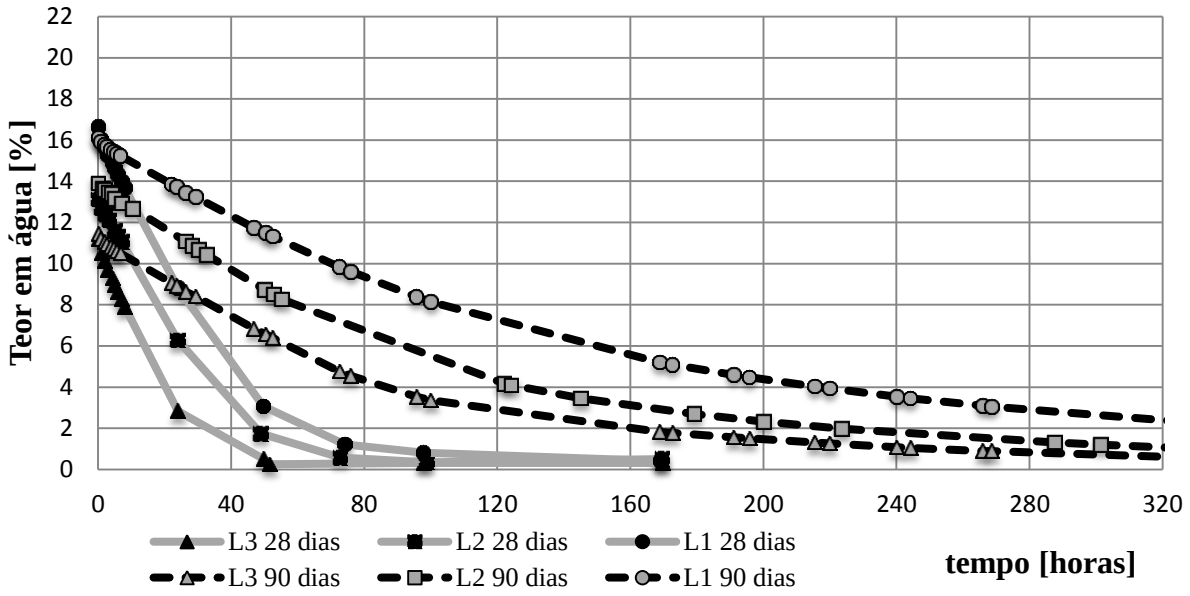

Figura 4.18 - Curvas de secagem das argamassas sem substituição de cal aérea por Mk.

Tal como referido acima o período de secagem decorrente do ensaio aos 90 dias é substancialmente superior do que aos 28 dias; este facto justifica a diferença nos traçados das curvas dos 28 dias quando comparados com os 90 dias.

Analisando as curvas retratadas no gráfico 4.18 é percetível uma maior dificuldade de secagem das argamassas com o aumento do traço volumétrico (aumento do teor em ligante); porém, até ao início da inflexão das curvas, o espaçamento entre estas (dado para o mesmo instante do ensaio) mantém-se constante, e de valor semelhante à diferença de teores de água inicias.

A argamassa L3 é, tanto aos 28 dias, como para os 90 dias, a argamassa que atinge o patamar de secagem mais rapidamente; por seu turno, L1 é aquela que leva mais tempo a evaporar a água no seu interior para o conjunto das duas idades de estudo

Na figura 4.19 apresentam-se as curvas de secagem das argamassas com 30% de substituição parcial da massa de cal aérea por metacaulino.

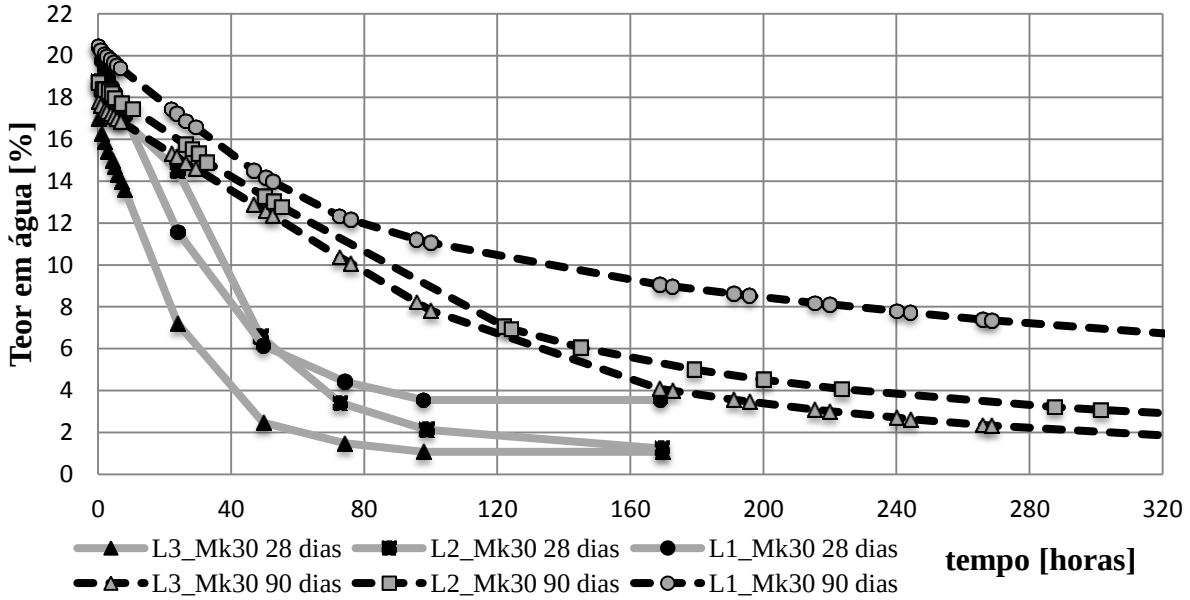

Figura 4.19 - Curvas de secagem das argamassas com 30% de Mk.

Nesta figura e face ao que se havia verificado na figura 4.18, nota-se um acréscimo da dificuldade de evaporação de água na argamassa L1_Mk30 a partir do ponto de inflexão da curva (ponto onde o declive da curva de secagem deixa de ser aproximadamente constante e passa a ser decrescente), a qual ocorre aproximadamente às 50 horas de ensaio, tanto para os 28, como para os 90 dias.

Tal como ocorre para as argamassas sem metacaulino, a velocidade de secagem é tanto menor quanto maior for o teor em ligante.

A argamassa L2 Mk_30 tem tendência a ter valores de teor em água finais idênticos aos de L3_Mk30 principalmente aos 28 dias de ensaio.

Na figura 4.20 estão expostas as curvas de secagem dos 28 dias e 90 dias de ensaio das argamassas com 50% de substituição de massa de cal aérea por metacaulino.

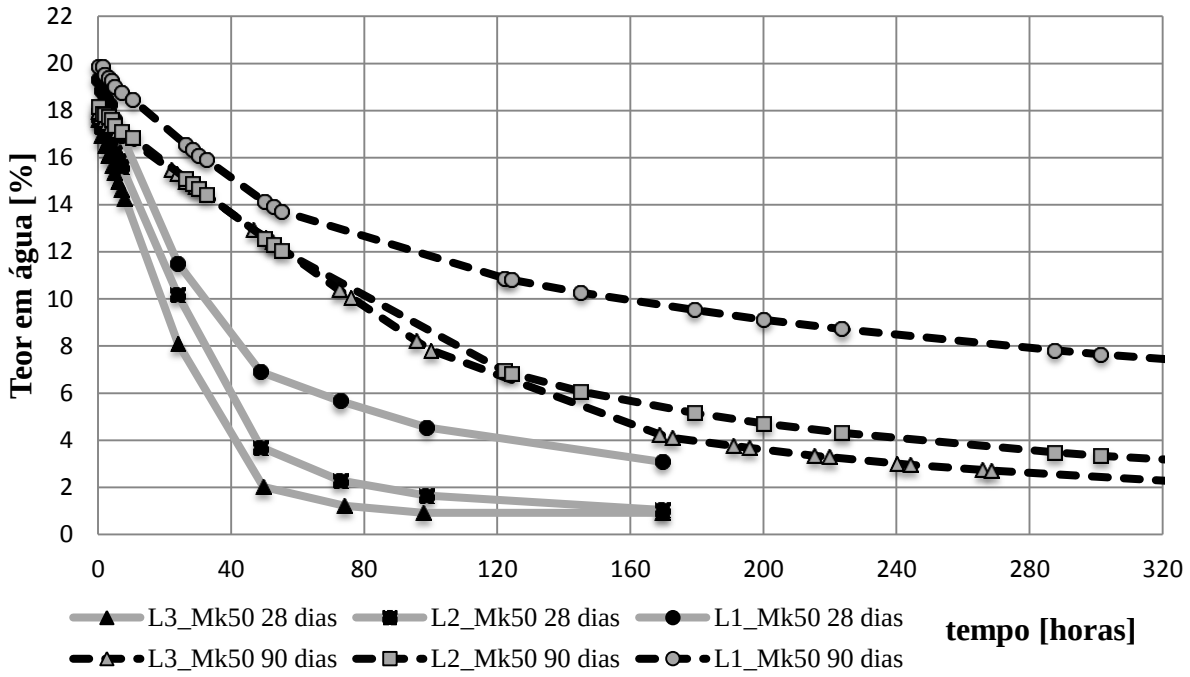

Figura 4.20 - Evolução das curvas de secagem das argamassas com 50% de Mk.

A figura revela uma tendência idêntica à verificada nas duas figuras anteriores (4.18 e 4.19) no sentido de que a argamassa com maior teor em ligante apresenta, a partir do ponto de inflexão da curva (aproximadamente às 50 hora dos ensaios a 28 e 90 dias), um acentuado abaixamento do declive da curva de secagem e que se traduz numa maior dificuldade de evaporação da água do interior dos meios provetes desta argamassa. A velocidade de secagem das argamassas L3_Mk50 e L2_Mk50 é idêntica para ambas as idades de ensaio.

4.3.5.2. **Influência do aumento do teor em metacaulino por substituição da massa de cal aérea**

Nas três figuras seguintes estudar-se-á a evolução das curvas de secagem às duas idades de ensaio segundo a influência do teor de metacaulino para cada um dos 3 traços volumétricos. Assim, na

figura 4.21 interpreta-se a sequência de valores das argamassas com traço volumétrico 1:3 aos 28 dias e 90 dias.

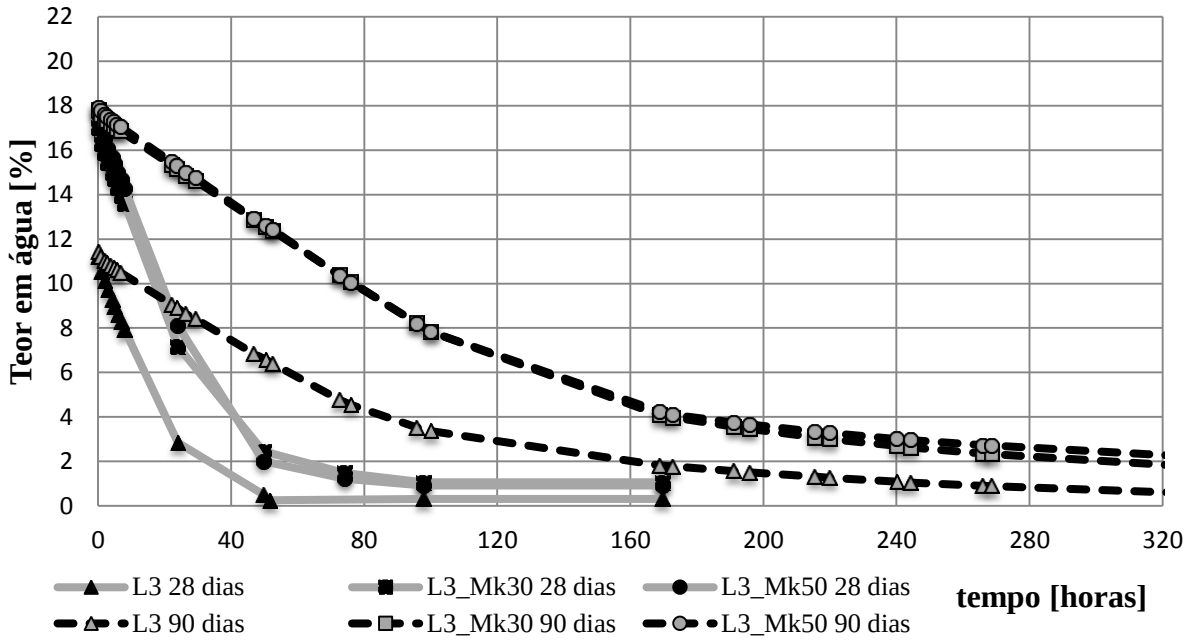

Figura 4.21 - Evolução das curvas de secagem das argamassas de traço volumétrico 1:3.

Nesta figura é clara a diferença de teores de água iniciais tanto aos 28 dias como aos 90 dias entre as argamassas com metacaulino e a argamassa sem Mk, porém denota-se um aproximar dos traçados das curvas das 0-50 horas no ensaio aos 28 dias e das 0-170 horas no ensaio aos 90 dias.

A argamassa L3 tem um valor de Teor em água (Wt) final inferior ao das argamassas L3_Mk30 e L3_Mk50 em ambas as idades, evidenciando uma maior dificuldade de remoção da água por evaporação quando Wt < 2% por parte das argamassas com metacaulino na sua constituição e traço volumétrico 1:3.

Na figura 4.22 apresentam-se as curvas de secagem das argamassas de traço volumétrico 1:2

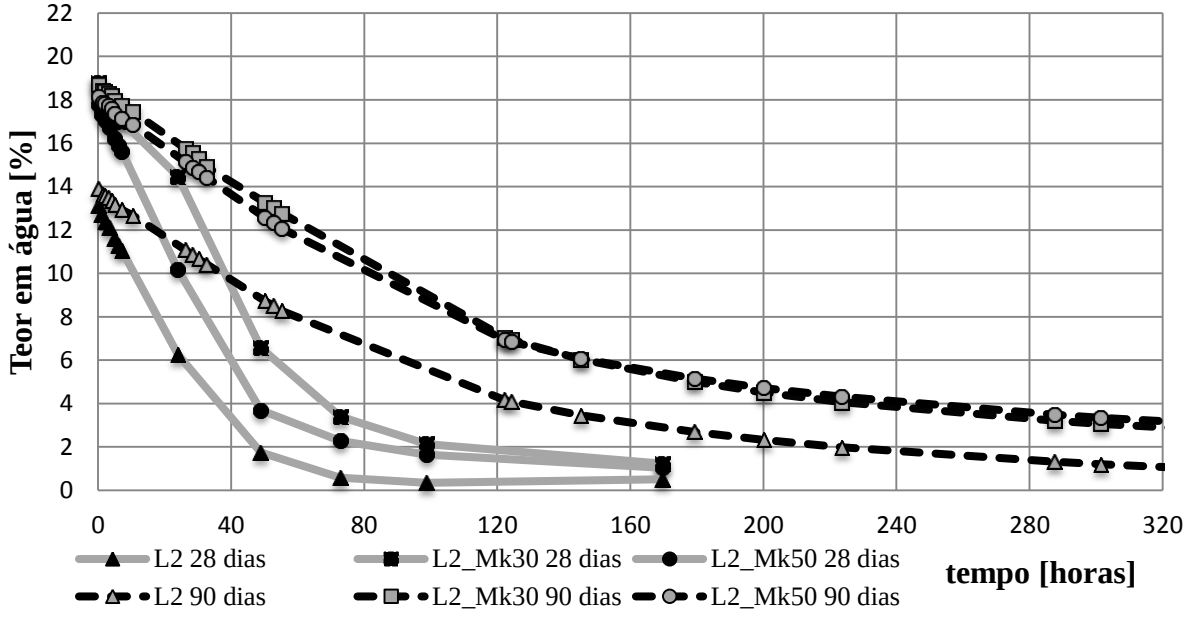

Figura 4.22 - Evolução das curvas de secagem das argamassas de traço volumétrico 1:2.

Efetuando a análise das curvas traçadas no gráfico da figura 4.22 identifica-se que o comportamento de secagem dos meios provetes destas argamassas é idêntico entre eles. De facto, para os 90 dias de ensaio, o perfil das curvas de secagem assemelha-se, havendo um espaçamento entre estas praticamente constante a partir das 120 horas de ensaio. Até às 120 horas, as argamassas L2_Mk30 e L2_Mk50 apresentam velocidades de secagem superiores a L2; porém, apesar das argamassas com Mk apresentarem uma maior percentagem de perda de água, é L2 a argamassa que apresenta o valor de Wt inicial e final mais baixo para este conjunto de argamassas.

O ensaio aos 28 dias evidencia traçados de curva semelhantes entre as argamassas, com o diferencial entre valores a manter-se constante às primeiras horas de ensaio. Os valores de teor de água final são convergentes para o conjunto das 3 argamassas, sendo porém o de L2 ligeiramente inferior ao das restantes argamassas.

Na figura 4.23 apresentam-se as curvas de secagem das argamassas de traço volumétrico 1:1

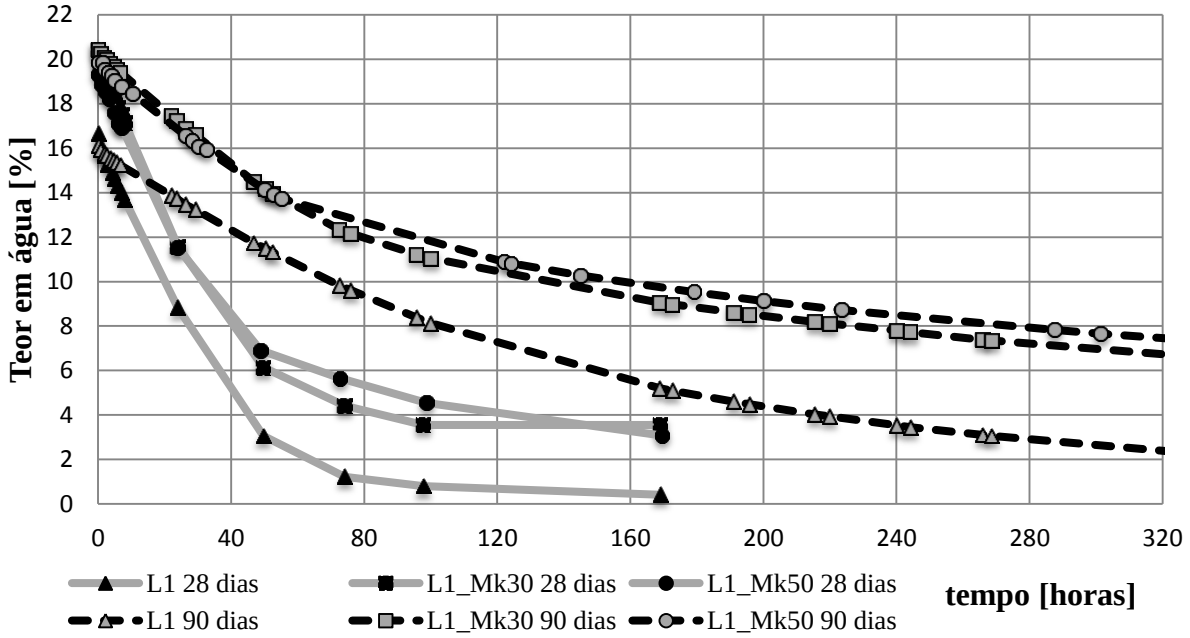

Figura 4.23 - Curvas de secagem das argamassas de traço volumétrico 1:1.

O gráfico da figura 4.23 demonstra que as 3 argamassas apresentam, aos 28 dias, velocidades de secagem idênticas até aproximadamente às primeiras 50 horas de ensaio, a partir das quais L1_Mk50 apresenta um decréscimo do declive da tangente à curva de secagem inferior às restantes argamassas. Também para este conjunto, é a argamassa sem metacaulino que apresenta, para as duas 2 idades de estudo, o valor menor de teor de água final.

Quanto ao ensaio aos 90 dias, L1_Mk30 apresenta uma velocidade de secagem até às 150 horas ligeiramente superior a L1_Mk50. Estas duas argamassas demonstram ter grande resistência à perda de água por evaporação, apresentando valores elevados de Wt após vários dias de ensaio. De facto, contrariamente ao evidenciado por L2 e L3 face às argamassas com Mk com o mesmo traço volumétrico, L1 apresenta valores e velocidades de secagem na fase complementar do ensaio superiores às argamassas com substituição parcial de cal por metacaulino.

4.3.6. POROSIDADE ABERTA

No quadro 4.9 e na figura 4.24 apresentam-se os valores médios de porosidade aberta e respetivos desvios-padrão de todas as argamassas às 2 idades de estudo.

Quadro 4.9 -Valores médios e desvios-padrão de Porosidade aberta aos 28 e 90 dias.

POROSIDADE ABERTA [%]									
Argamassa	**L3**	**L3_Mk30**	**L3_Mk50**	**L2**	**L2_Mk30**	**L2_Mk50**	**L1**	**L1_Mk30**	**L1_Mk50**
28 dias	29,5	32,8	33,2	30,5	33,4	32,0	31,9	35,6	33,5
Dp	0,9	0,3	0,9	0,3	0,0	0,8	0,1	0,2	0,3
90 dias	31,1	35,7	36,1	23,3	31,2	30,3	33,6	33,5	33,0
Dp	2,3	0,5	2,0	0,4	0,4	0,4	1,5	0,8	0,1

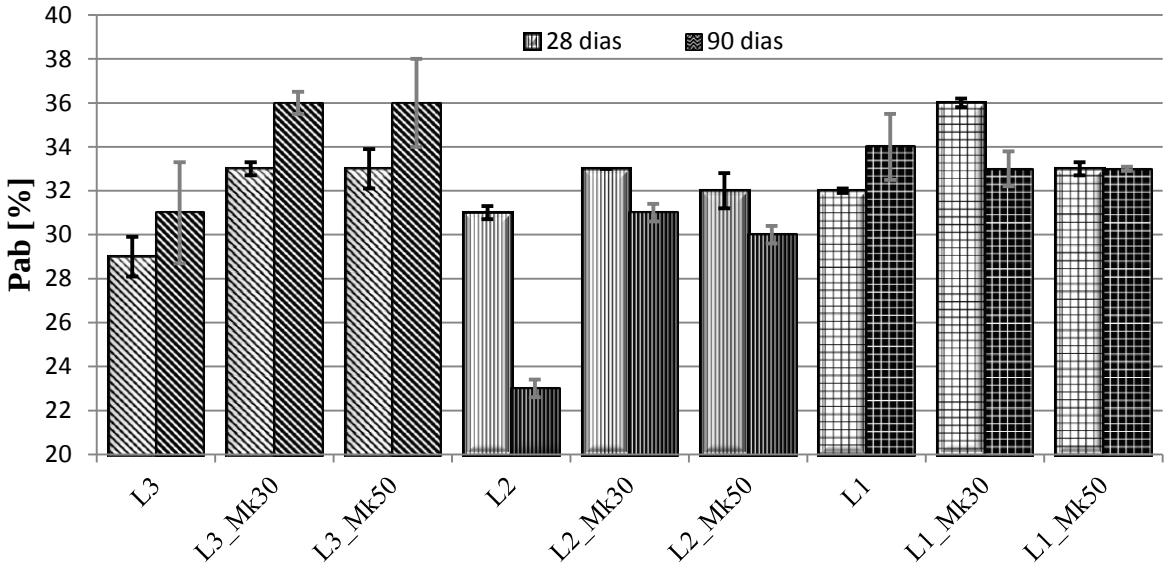

Figura 4.24 - Porosidade aberta aos 28 e aos 90 dias para o conjunto de todas as argamassas.

Como indicado na secção 3.3.6, os métodos de determinação de Pab foram distintos entre idades; ocorreram algumas perdas de material ao longo do procedimento de ensaio realizado aos 28 dias, o que torna a comparação de valores a idades diferentes pouco fidedigna. No entanto, é possível porém comparar as argamassas para a mesma idade de ensaio.

Os valores de Porosidade aberta por provete são apresentados no anexo IV.

Análise aos 28 dias

Aos 28 dias os valores de Porosidade Aberta obtidos situam-se no intervalo entre os 29-36 %. A análise da figura 4.24 segundo o traço volumétrico aos 28 dias indica que as argamassas com traço 1:3 sofrem um aumento progressivo de Pab com o aumento do teor em metacaulino, sendo este mais significativo entre L3 e L3_Mk30 e na ordem dos 2%.

Para o traço volumétrico 1:2 mantêm-se a mesma tendência de aumento de Pab entre as argamassas L2 e L2_Mk30 aos, ocorrendo porém uma diminuição do valor deste parâmetro de cerca de 1% entre L2_Mk30 e L2_Mk50.

A situação descrita na análise das argamassas de traço 1:2 verifica-se também para as argamassas de traço volumétrico 1:1, porém os valores de Pab são superiores aos das argamassas com o mesmo teor em Mk mas de outros traços volumétricos.

A análise do gráfico da figura 4.24 segundo o teor crescente em metacaulino indica que as argamassas sem incorporação de pozolana na sua matriz de ligante apresentam, aos 28 dias valores de Pab crescentes com o aumento do teor em ligante da argamassa; esse aumento é de cerca de 2% por traço volumétrico.

Para o caso das argamassas com 30% de metacaulino, a Porosidade aberta aumenta igualmente com o aumento do traço volumétrico, sendo o aumento mais pronunciado entre argamassas com metacaulino (L2_Mk30 e L2_Mk50).

No caso das argamassas em que 50% da massa de ligante é metacaulino, os valores mais elevados registam-se para L3_Mk50 e L1_Mk50, pelo que a tendência demonstrada pelo conjunto de argamassas sem e com 30% de Mk não se verifica.

Análise aos 90 dias

Aos 90 dias temos conjuntos de argamassas ensaiadas de forma distinta, as argamassas L3, L3_Mk30, L3_Mk50, L1 e L1_Mk30 foram ensaiadas com collants enquanto as argamassas L2, L2_Mk30, L2_Mk50 e L1_Mk50 foram ensaiadas sem collants (podendo ter ocorrido perdas de material). Assim, as comparações mais fidedignas serão entre o conjunto das argamassas de traço volumétrico 1:3 e 1:2 separadamente.

No caso das argamassas 1:3 denota-se um claro aumento de Pab entre a argamassa sem metacaulino (L3) e as argamassas L3_Mk30 e L3_Mk50, na ordem dos 4-5%.

Para o caso do traço volumétrico 1:2, o aumento referenciado para as argamassas de traço volumétrico 1:3 torna-se ainda mais significativo, nomeadamente entre L2 e L2_Mk30, com um aumento de 8%. Porém o valor de L2 aos 90 dias é excessivamente baixo. O desvio padrão desta argamassa é igualmente baixo (0,4 mm) indicando que o fenómeno foi comum às três amostras analisadas desta argamassa. Como mencionado anteriormente, as pesagens das amostras foram efetuadas com collants de nylon, de forma a reduzir a tendência de perda de material entre pesagens. Dessa forma não é claro o motivo pelo qual o valor diverge tanto por defeito dos valores das restantes argamassas, nomeadamente das argamassas L1 e L3.

Apesar do emprego de 2 métodos diferentes para a determinação da Porosidade aberta, é notório, para todos os traços e em ambas as idades de estudo, que as argamassas com 30 % de teor em metacaulino são aquelas que revelam ter um contributo mais significativo para o aumento deste parâmetro face às argamassas de cal aérea sem pozolana.

4.3.7. ENSAIOS QUÍMICOS, MINERALÓGICOS E MICROESTRUTURAIS

Os ensaios de difração de raios X (DRX), análise termogravimétrica e térmica diferencial (TG-ADT), foram realizados no LNEC, pelo bolseiro André Gameiro (GAMEIRO et al.,2012). Alguns dos resultados obtidos, serão utilizados no capítulo referente à discussão de resultados de forma a complementar a informação recolhida na caracterização mecânica das argamassas e cujos valores não se enquadraram nos parâmetros expectáveis ou cuja evolução entre idades não revelou a tendência evidenciada pelas argamassas com o mesmo traço volumétrico e/ou teor em metacaulino.

Os resultados de DRX e dTG (GAMEIRO et al.,2012) são apresentados no anexo V.

4.3.8. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

Como indicado no capítulo referente ao Desenvolvimento Experimental, o ensaio decorreu aos 135 dias sobre 2 dos 3 provetes por argamassa ensaiados aos restantes parâmetros aos 28 dias.

No quadro 4.10 apresentam-se os valores médios e desvio-padrão de condutibilidade térmica das argamassas aos 28 e 90 dias

Quadro 4.10 - Valores médios e desvio-padrão da condutibilidade térmica determinada aos 135 dias de idade de argamassas que estiveram em cura húmida até aos 28 dias.

CONDUTIBILIDADE TÉRMICA [W/m.K]									
Argamassa	**L3**	**L3_Mk30**	**L3_Mk50**	**L2**	**L2_Mk30**	**L2_Mk50**	**L1**	**L1_Mk30**	**L1_Mk50**
135 dias	0,691	0,552	0,585	0,688	0,630	0,648	0,788	0,621	0,634
Dp	0,040	0,026	0,015	0,010	0,021	0,013	0,044	0,021	0,033

Na figura 4.25 estão apresentados graficamente os valores resultantes do ensaio de determinação da condutibilidade térmica.

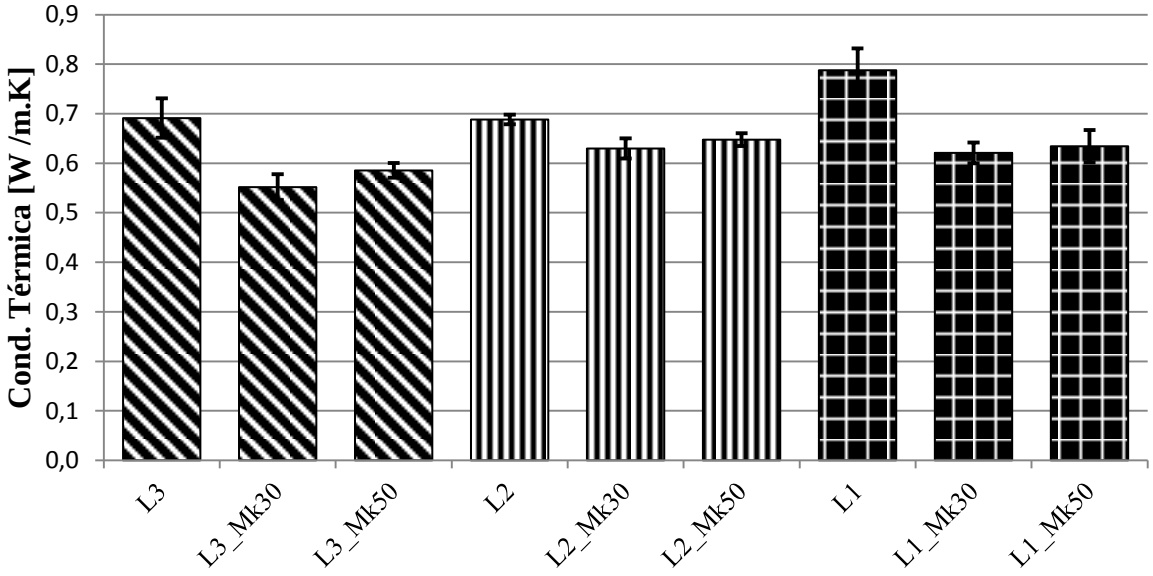

Figura 4.25 - Valores de condutibilidade térmica aos 135 dias para o conjunto de todas as argamassas.

A interpretação do gráfico de colunas acima indica que a argamassa com maior valor de condutibilidade térmica é L1 e aquela que apresenta o menor valor e dessa forma mais interessante a nível de desempenho térmico é L3_Mk30. No entanto, e embora a metodologia de ensaio possa ter sido distinta, todas as argamassas registam valores de λ entre 0,55-0,79 W/(m.K), logo bastante interessantes face aos valores mínimos apresentados no ITE50 do LNEC (PINA DOS SANTOS, 2006) para rebocos.

A análise dos resultados deste ensaio indica que, por comparação com as argamassas do mesmo traço volumétrico, as argamassas sem adição de metacaulino, ou seja, L3, L2 e L1, são as que apresentam os maiores valores de condutibilidade térmica. A utilização de Mk reduz a condutibilidade térmica das argamassas, o que, numa aplicação numa camada de reboco, por exemplo, aumenta ligeiramente a resistência térmica da parede. É igualmente notória uma ligeira diminuição dos valores de condutibilidade nas argamassas com 30 % de substituição de massa de cal aérea por metacaulino comparativamente com as de 50% de substituição. Esta situação é transversal aos 3 traços volumétricos analisados.

No que concerne ainda a análise segundo o teor em metacaulino, verificam-se para as argamassas sem Mk valores idênticos entre L3 e L2, apresentando L1 o valor máximo.

No caso do conjunto das argamassas com 30% de metacaulino, verifica-se para este caso que o valor mais baixo é de L3_Mk30, apresentando L2_Mk30 e L1_Mk30 valores superiores mas idênticos entre si. Tendência idêntica verificou-se para o conjunto de argamassas com 50 % de metacaulino, ou seja a argamassa L3_Mk50 apresentou um valor menor que o conjunto das argamassas L2_Mk50 e L1_Mk50, as quais têm valores de condutibilidade térmica idênticos. O aumento do traço em ligante aumenta assim a condutibilidade térmica das argamassas.

Os resultados de condutibilidade térmica por provete são apresentados no anexo IV.

4.3.9. RESISTÊNCIA À AÇÃO DOS SULFATOS

O ensaio para a determinação da resistência à ação dos sulfatos decorreu aos 145 dias de idade. Os meios provetes ensaiados foram aqueles que haviam sido utilizados para a determinação da capilaridade e secagem aos 28 e 90 dias, tendo ficado após essas datas acondicionados no laboratório de cura standard (HR de 65±5 % e temperatura de 23±3 °C) até à data da realização deste ensaio.

Na figura 4.26 são apresentadas as curvas indicativas da variação de massa média em cada ciclo devido à ação dos sulfatos sobre os meios provetes sujeitos aos ensaios indicados acima aos 28 dias. Na figura 4.27 estão representadas as curvas referentes aos meios provetes previamente caracterizados aos 90 dias.

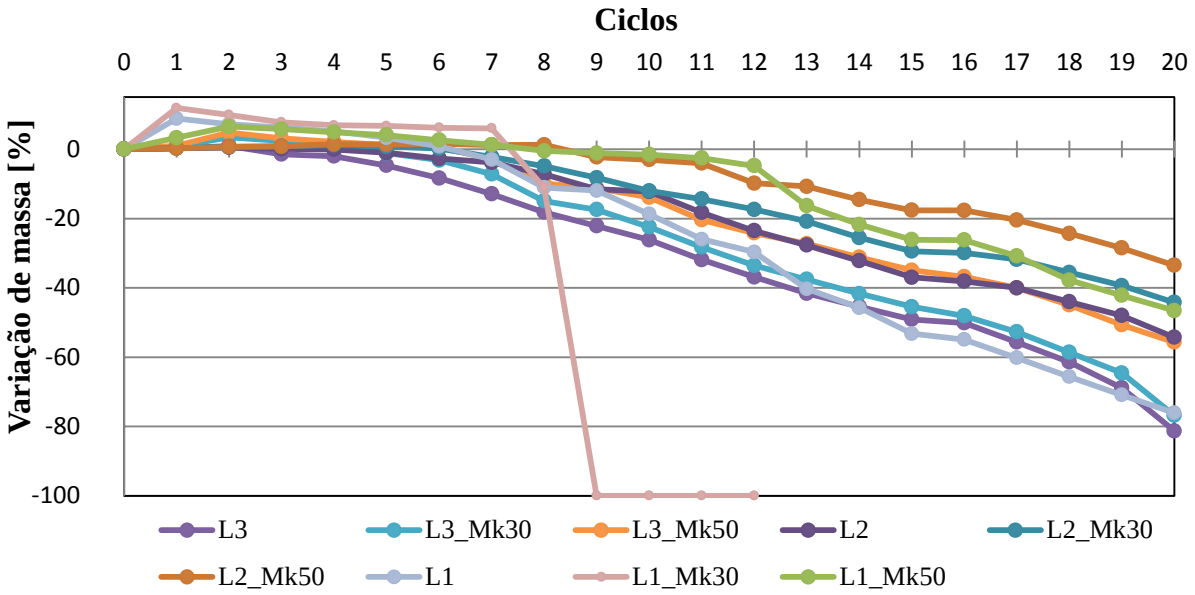

Figura 4.26 - Variação da massa média por ação dos sulfatos das argamassas em cura húmida até aos 28 dias.

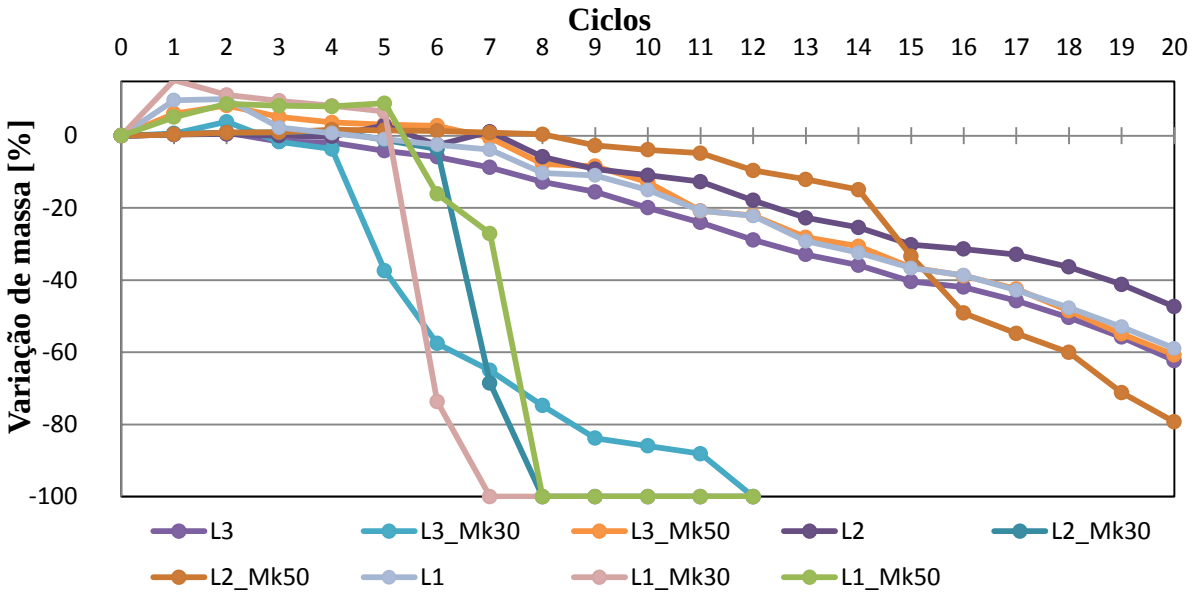

Figura 4.27 - Variação da massa média por ação dos sulfatos das argamassas em cura húmida até aos 90 dias.

Analisando a evolução das argamassas ensaiadas aos 28 dias (figura 4.26) é percetível a total desintegração dos 3 meios provetes da argamassa L1_MK30 28 dias logo a partir do 9º ciclo. A partir do 8º ciclo, a variação de massa entre as diferentes argamassas ganha uma maior disparidade.

A argamassa que mantém a maior integridade ao fim dos 20 ciclos de ensaio é a argamassa L2_Mk50 com uma perda de massa média de aproximadamente 37 %.

O conjunto de argamassas previamente ensaiadas aos 28 dias que melhor resistiram ao ataque dos sulfatos foram as argamassas com substituição parcial de metacaulino com traços volumétricos com maior teor em ligante, tais como, L1_MK50, L2_MK30 e L2_MK50 em ordem crescente de menor massa perdida.

Em contraponto, além da argamassa L1_Mk30 acima referida, são as argamassas sem adição de metacaulino e com traços volumétricos mais fortes (L2 e L1) aquelas que apresentam pior comportamento face à ação do Na_2SO_4.

Comparativamente ao que sucede para as curvas de variação de massa das argamassas estudadas previamente aos 28 dias de ensaio, as argamassas cujos ensaios antecedentes decorreram aos 90 dias (figura 4.27) apresentam maior suscetibilidade de decomposição devido ao ataque dos sulfatos. A maior facilidade de decomposição está patente na perda de massa total das argamassas L1_Mk30 e L1_Mk50 e L2_Mk30 logo ao 8º ciclo. No que concerne a estas duas últimas argamassas, parece que a permanência por mais 60 dias na sala de cura húmida enfraquece o seu comportamento face a este agente químico, uma vez que aos 28 dias, estas quantificavam-se entre as argamassas com menor variação total de massa ao fim dos 20 ciclos do ensaio. Essa situação poderá ser devida à reação pozolânica ter conduzido ao estabelecimento de mais compostos hidratados nas argamassas, que reagiram com os sulfatos, produzindo mais compostos expansivos. Esta situação será analisada no capítulo da discussão de resultados.

Aos 90 dias, são as argamassas sem metacaulino que revelam ter o melhor comportamento face à ação dos sulfatos, com perdas médias de massa na ordem dos 45-60 % da sua massa total.

A figura 4.28 apresenta a variação média de massa das argamassas ao 7º ciclo de ensaio.

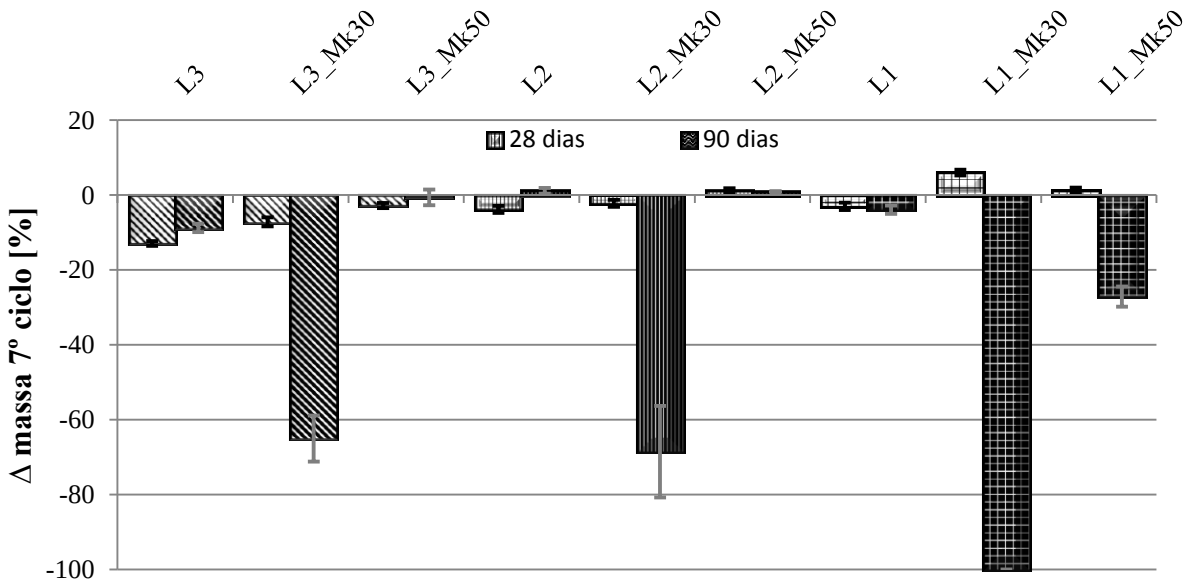

Figura 4.28 - Variação de massa das argamassas ao 7º ciclo do ensaio de resistência aos sulfatos.

No 7º ciclo ocorre a primeira decomposição total de uma das argamassas, no caso L1_Mk30 aos 90 dias. Esta perspetiva intermédia do ensaio permite obter informações relevantes sobre o comportamento das argamassas ao ataque do NA_2SO_4, tais como: a tendência das argamassas com substituição parcial de 30% da massa de cal por metacaulino para apresentarem uma menor resistência a este ataque químico, nomeadamente as argamassas que permaneceram até aos 90 dias na sala de cura húmida; à exceção do que sucede para a argamassa L1_Mk50 aos 90 dias, todas as argamassas com 50% de metacaulino, apresentam menores perdas de massa ao 7º ciclo comparativamente com as argamassas com 0% ou 30% de substituição de massa do ligante por Mk do mesmo traço volumétrico.

As argamassas L2_Mk50, L2_Mk30 e L1_Mk50 aos 28 dias e L2 e L2_Mk50 aos 90 dias apresentam ganhos de massa ao 7º ciclo do ensaio.

5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No quadro 5.1 são apresentados, para todas as argamassas, os resultados médios de todos os ensaios efetuados com respetivos desvios-padrão, aos 28 e 90 dias de idade.

No caso dos ensaios de absorção capilar e secagem relembra-se o facto de se terem seguido procedimentos de ensaio com algumas diferenças a cada idade, pelo que nesse caso a comparação entre idades não ser exata.

No caso do ensaio de resistência à ação dos sulfatos, quando a perda de massa foi total antes do 20º ciclo é indicado o ciclo em que ocorreu. O ensaio ocorreu aos 145 dias e recaiu sobre o total das argamassas, que tinham permanecido na cura húmida até às respetivas idades de ensaio, aos 28 ou aos 90 dias; assim, na tabela é indicada essa idade.

Quadro 5.1 - Resultados globais de caracterização das argamassas aos 28 e 90 dias de idade.

Ensaios	**Idade/ Desvio Padrão**	**Argamassas**								
		L3	L3_Mk30	L3_Mk50	L2	L2_Mk30	L2_Mk50	L1	L1_Mk30	L1_Mk50
E_{din} (MPa)	28 dias	729	4245	6690	1969	6104	9383	1728	10394	11747
	Dp	189	95	1022	125	22	265	138	90	308
	90 dias	3191	1629	3427	3007	6370	8244	2884	8089	10193
	Dp	109	100	314	490	357	1597	150	242	532
R_T (MPa)	28 dias	0,08	0,59	1,09	0,18	0,67	1,13	0,30	2,07	1,78
	Dp	0,01	0,03	0,02	0,01	0,09	0,08	0,06	0,24	0,35
	90 dias	0,24	0,16	0,58	0,36	0,65	1,43	0,44	1,33	2,62
	Dp	0,09	0,01	0,31	0,02	0,10	0,30	0,03	0,93	1,70
R_C (MPa)	28 dias	0,13	1,16	2,82	0,30	2,99	6,33	0,45	6,88	13,47
	Dp	0,05	0,02	0,08	0,03	0,04	0,06	0,04	0,19	0,09
	90 dias	0,41	0,81	1,89	0,62	3,61	7,03	0,68	5,55	15,28
	Dp	0,05	0,05	0,59	0,03	0,27	0,63	0,39	3,68	0,25
CC ($kg/m^2.min^{0,5}$)	28 dias	0,845	1,196	1,058	1,397	0,908	0,509	1,482	0,732	0,374
	Dp	0,095	0,065	0,138	0,243	0,024	0,008	0,135	0,031	0,042
	90 dias	1,138	1,610	1,153	1,042	0,941	0,824	1,766	0,922	0,701
	Dp	0,036	0,078	0,140	0,211	0,070	0,155	0,160	0,023	0,112
VA (kg/m^2)	28 dias	15,9	23,3	24,9	17,4	26,1	24,2	21,2	27,0	24,8
	Dp	0,4	2,1	1,9	0,2	1,1	0,5	0,4	2,1	0,4
	90 dias	17,8	26,8	26,5	18,6	24,8	22,9	23,0	28,8	26,7
	Dp	0,5	1,0	0,7	0,9	0,5	1,3	0,9	0,8	0,3
Pab (%)	28 dias	29	33	33	31	33	32	32	36	33
	Dp	0,9	0,3	0,9	0,3	0,0	0,8	0,1	0,2	0,3
	90 dias	31	36	36	23	31	30	34	33	33
	Dp	2,3	0,5	2,0	0,4	0,4	0,4	1,5	0,8	0,1

Ensaios	Idade/ Desvio Padrão	Argamassas								
		L3	L3_Mk30	L3_Mk50	L2	L2_Mk30	L2_Mk50	L1	L1_Mk30	L1_Mk50
IS [-]	28 dias	0,36	0,29	0,29	0,29	0,30	0,36	0,33	0,42	0,35
	Dp	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	90 dias	0,27	0,35	0,36	0,22	0,30	0,31	0,40	0,50	0,47
	Dp	0,02	0,01	0,03	0,00	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02
TS [kg/m^2.h]	28 dias	0,44	0,46	0,45	0,29	0,24	0,30	0,41	0,46	0,33
	Dp	0,04	0,02	0,04	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,02
	90 dias	0,16	0,16	0,15	0,13	0,12	0,13	0,15	0,17	0,16
	Dp	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03
Sulfatos (Δ massa ao 20º ciclo em %)	28 dias	-81,3	-76,8	-55,7	-54,3	-44,2	-33,5	-76,1	100$^{(9º)}$	-48,0
	Dp	17,3	20,1	0,01	6,9	2,8	0,5	2,9	0	7,2
	90 dias	-62,3	-100$^{(12º)}$	-60,7	-47,4	-100$^{(8º)}$	-79,3	-58,9	-100$^{(7º)}$	-100$^{(8º)}$
	Dp	4,3	0	5,7	0,3	0	35,9	4,4	0	0
Cond. Térmica (W/mK)	135 dias	0,691	0,552	0,585	0,688	0,630	0,648	0,788	0,621	0,634
	Dp	0,040	0,026	0,015	0,010	0,021	0,013	0,044	0,021	0,033

No seguimento dos valores médios obtidos e apresentados no quadro 5.1, apresenta-se no quadro 5.2 a tendência de evolução dos parâmetros estudados neste trabalho das argamassas com metacaulino face às argamassas só de cal aérea com o mesmo traço volumétrico, ou seja, face às argamassas L3, L2 e L1 que são as argamassas de referência. As setas a vermelho indicam uma evolução desfavorável do parâmetro, enquanto as verdes revelam uma tendência favorável face à respetiva argamassa sem Mk do mesmo traço volumétrico; as setas pretas revelam uma tendência que pode ser benéfica ou prejudicial, em função do tipo de aplicação e dos requisitos pretendidos para as argamassas; quando não existe seta significa que se registou um valor da mesma ordem de grandeza.

Quadro 5.2 - Tendência de evolução dos parâmetros das argamassas com Mk face a L3 e L2 e L1.

Ensaios	Idade	Argamassas								
		L3	L3_Mk30	L3_Mk50	L2	L2_Mk30	L2_Mk50	L1	L1_Mk30	L1_Mk50
E_{din} (MPa)	28 dias	-	↑	↑	-	↑	↑	-	↑	↑
	90 dias	-	↓	↑	-	↑	↑	-	↑	↑
R_T (Mpa)	28 dias	-	↑	↑	-	↑	↑	-	↑	↑
	90 dias	-	↓	↑	-	↑	↑	-	↑	↑
R_C (MPa)	28 dias	-	↑	↑	-	↑	↑	-	↑	↑
	90 dias	-	↑	↑	-	↑	↑	-	↑	↑
CC (kg/m^2.min^{0,5})	28 dias	-	↑	↑	-	↓	↓	-	↓	↓
	90 dias	-	↑	-	-	↓	↓	-	↓	↓
VA (kg/m^2)	28 dias	-	↑	↑	-	↑	↑	-	↑	↑
	90 dias	-	↑	↑	-	↑	↑	-	↑	↑
Pab (%)	28 dias	-	↑	↑	-	↑	↑	-	↑	↑
	90 dias	-	↑	↑	-	↑	↑	-	-	↓
IS [-]	28 dias	-	↓	↓	-	↓	↑	-	↑	↑
	90 dias	-	↑	↑	-	↑	↑	-	↑	↑
TS [kg/m^2.h	28 dias	-	↑	↑	-	↓	↑	-	↑	↓
	90 dias	-	-	↓	-	↓	-	-	↑	↑
Cond. Térmica (W/mK)	135 dias	- -	↓	↓	-	↓	↓	-	↓	↓

A análise do quadro 5.2 indica uma tendência clara de aumento, aos 28 dias de idade, das três características mecânicas de todas as argamassas face as argamassas, L3 L2 e L1 (argamassas de referência). A tendência de aumento verificada aos 28 dias, mantêm-se aos 90 dias (exceto para o E_{din} e R_T da argamassa L3_Mk30). A análise qualitativa da evolução das caraterísticas mecânicas será efetuada no capítulo 5.1, por comparação com os da gama de valores estipulados por Veiga et al. (2010) para aplicações de argamassas em edifícios antigos e na norma EN 998-1:2010 (CEN, 2010).

Face aos parâmetros caracterizantes do ensaio de absorção capilar, verifica-se que a introdução de Mk na matriz do Ligante é prejudicial na ótica do aumento do Coeficiente de Capilaridade (CC) das argamassas de traço volumétrico 1:3 e benéfico para as argamassas de traços volumétricos mais fortes em ligante, por contribuir para a redução do valor deste parâmetro nestas argamassas. Porém o beneficio demonstrado na redução dos valores de CC de algumas das argamassas é contrariado pelo aumento do Valor Assimptótico de todas as argamassas face às argamassas de referência. No entanto, representando o CC a velocidade com que se inicia a absorção de água por capilaridade, este parâmetro poderá ser considerado como mais significativo que o VA, especialmente para períodos de chuva ou e acesso de água não muito prolongado. As tendências enunciadas, verificam-se para ambas as idades de ensaio.

A Porosidade aberta (Pab) também aumentou em ambas as idades para todas as argamassas face às argamassas sem Mk (exceto no caso das argamassas de traço 1:1 aos 90 dias). Indicia que a substituição de cal por Mk nos traços 1:2 e 1:3 tem tendência a reduzir a compacidade das argamassas, embora com aumento das características mecânicas, tal como foi anteriormente registado. Esta alteração na estrutura porosa deve justificar, pelo menos em parte, o acréscimo de VA.

O Índice de Secagem (IS) aumentou aos 28 dias para as argamassas L2_Mk50 e L1_Mk30 e L1_Mk50 face às argamassas sem metacaulino, o que se traduz numa maior dificuldade de secagem. Aos 90 dias porém, o IS aumenta em todas as argamassas de cada traço, face às suas argamassas de referência, o que não constitui uma melhoria deste parâmetro face às argamassas só com cal aérea como ligante. No entanto, a Taxa de Secagem (TS), que traduz a velocidade inicial com que decorre a secagem, aumentou genericamente para todas as argamassas em ambas as idades, sendo esse facto positivo. As exceções verificaram-se para L2_Mk30 e L1_Mk50 aos 28 dias e para L3_Mk50 e L2_Mk30 aos 90 dias.

O aumento do traço volumétrico associado à substituição parcial da massa de cal aérea por metacaulino revela ser benéfico na redução do coeficiente de condutibilidade térmica dos provetes das argamassas analisadas. A argamassa L1, com um traço mais forte em ligante, apresenta pior comportamento térmico entre as argamassas de referência.

No quadro 5.3 indica-se a tendência de evolução dos parâmetros das argamassas sem metacaulino face à argamassa L3.

Quadro 5.3 - Tendência de evolução dos parâmetros das argamassas sem Mk face a L3.

Ensaios	Idade	Argamassas		
		L3	L2	L1
E_{din} (MPa)	28 dias	-	↑	↑
	90 dias	-	↓	↓
R_T (Mpa)	28 dias	-	↑	↑
	90 dias	-	↑	↑
R_C (MPa)	28 dias	-	↑	↑
	90 dias	-	↑	↑
CC ($kg/m^2.min^{0,5}$)	28 dias	-	↑	↑
	90 dias	-	↓	↑
VA (kg/m^2)	28 dias	-	↑	↑
	90 dias	-	↑	↑
Pab (%)	28 dias	-	↑	↑
	90 dias	-	↓	↑
IS [-]	28 dias	-	↓	↓
	90 dias	-	↓	↑
TS [$kg/m^2.h$]	28 dias	-	↓	↓
	90 dias	-	↓	↓
Cond. Térmica (W/mK)	135 dias	- -	↓	↑

Face ao que sucede no quadro 5.2, quanto à evolução das características mecânicas, também o aumento do traço em ligante entre argamassas sem Mk, tal como era expectável, provoca um aumento destes parâmetros face à argamassa de referência (L3) como revela o quadro 5.3. Verifica-se uma exceção para E_{din} aos 90 dias, cujos valores das argamassas L2 e L1 decresceram face a L3.

O aumento da concentração de cal aérea na mistura produz um efeito negativo sobre os parâmetros extraídos do ensaio de absorção capilar, uma vez que tanto o Valor Assimptótico como Coeficiente de Capilaridade aumentam em ambas as idades, o que constitui uma desvantagem.

Os valores de Porosidade aberta aumentam para ambas as argamassas aos 28 e 90 dias, (exceto L2 que aos 90 dias apresenta um valor excessivamente baixo como mencionado no subcapítulo 4.3.6.). Com efeito a argamassa com menor teor em ligante, e mais baixas resistências mecânicas, revela-se em termos globais como a menos porosa e menos capilar.

Quanto aos parâmetros do ensaio de secagem, ocorre uma diminuição genérica do Índice de Secagem (exceto para L1 aos 90 dias) com o aumento do teor em ligante, sendo esta uma evolução positiva. Porém a argamassa com menor traço em ligante apresenta uma maior Taxa de Secagem em ambas as idades, o que é de salientar.

Quanto à condutibilidade térmica, o aumento da relação Ligante:Agregado revela-se positiva na argamassa L2, uma vez que contribuiu para a redução desta característica, e negativo na argamassa L1, devido ao aumento face a L3.

Nos próximos subcapítulos serão discutidos alguns dos valores e tendências apresentados no capítulo da análise e tratamento de resultados, através do cruzamento dos valores de diversos

parâmetros ou com os resultados dos ensaios de difração de raios X, termogravimétricos e de diferencial térmico, no caso das características mecânicas.

5.1. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

As figuras 5.1 e 5.2 apresentam os valores médios das 3 características mecânicas ensaiadas no âmbito desta dissertação, respetivamente aos 28 e 90 dias. Os mesmos valores médios e respetivos desvios-padrão encontram-se no quadro 5.1.

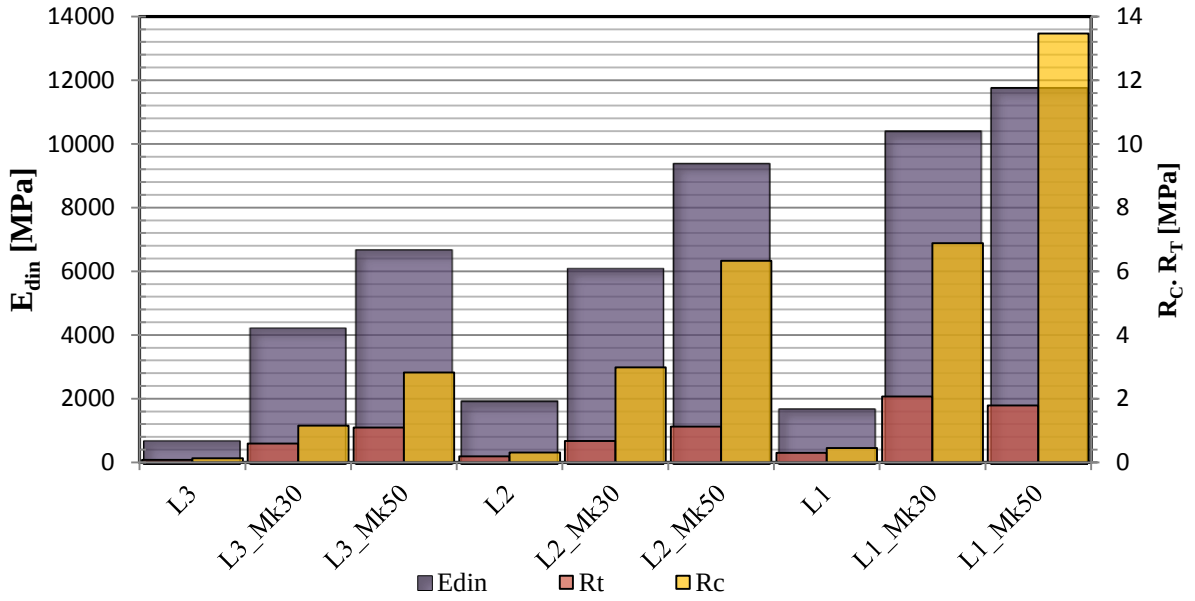

Figura 5.1 - Comparação das características mecânicas aos 28 dias.

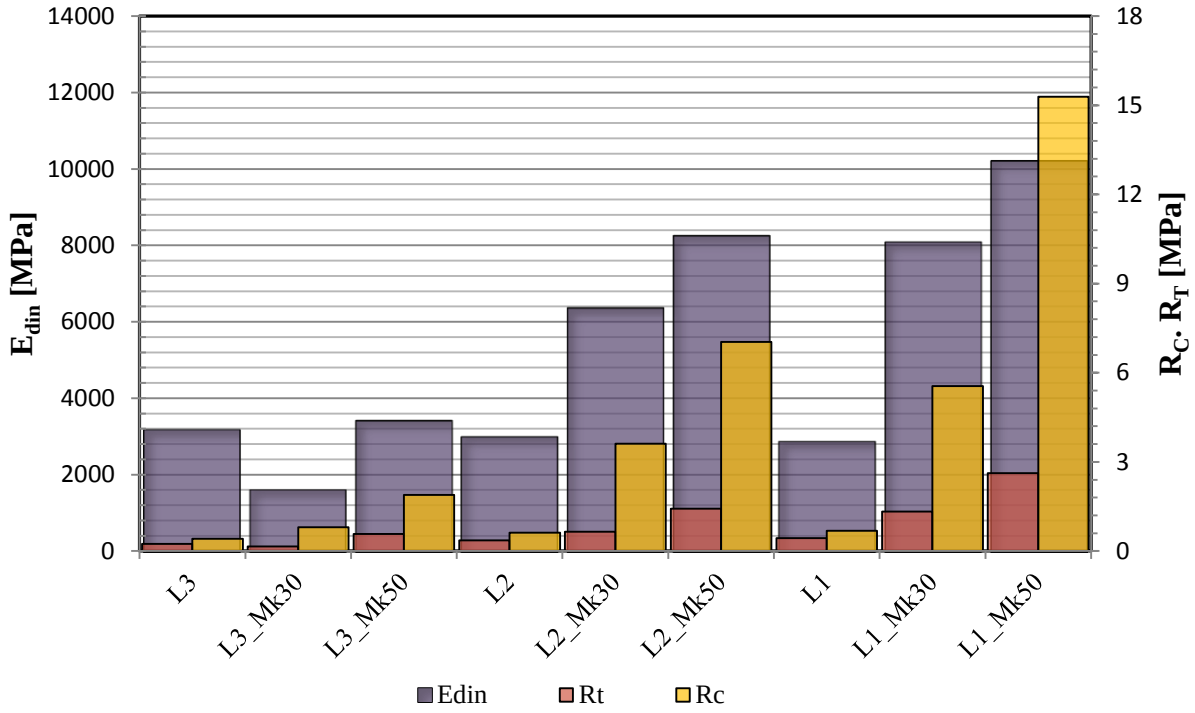

Figura 5.2 - Comparação das características mecânicas aos 90 dias.

Interessa que as características mecânicas sejam suficientemente elevadas para aplicação no refechamento de juntas ou em rebocos mas não demasiado para não provocarem o desenvolvimento de tensões que ponham em causa todo o conjunto das alvenarias antigas (FARIA et al., 2012b). Veiga et al. (2010) definiram uma gama de valores indicativos, obtidos aos 90 dias, para argamassas edifícios antigos, os quais são indicados no quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Parametrização de valores aceitáveis de resistências mecânicas aos 90 dias consoante o tipo de aplicação da argamassa em edifícios antigos (VEIGA et al., 2010).

Resistências Mecânicas			
	R_T [MPa]	R_C [MPa]	E_{din} [MPa]
Reboco	0,2-0,7	0,4-2,5	2000-5000
Juntas	0,4-0,8	0,6-3,0	3000-6000

Na figura 5.3 apresentam-se os valores obtidos aos 90 dias para cada uma das três características mecânicas (Quadro 5.1) e representa-se por recurso a linhas horizontais, os valores extremos dessas características mecânicas, indicadas por Veiga et al. (2010) do quadro 5.4.

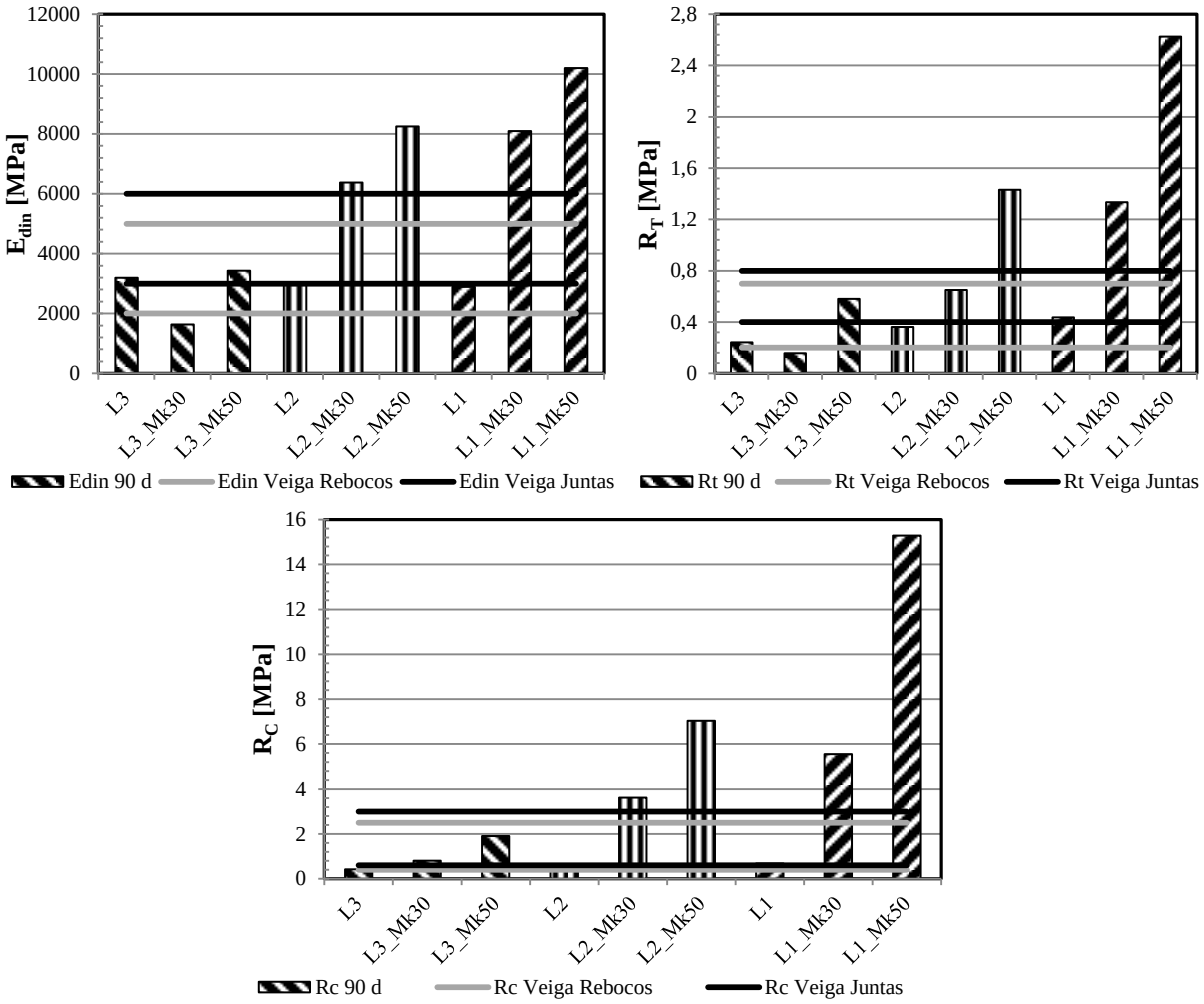

Figura 5.3 - Características mecânicas das argamassas aos 90 dias e gamas de valores de Veiga et al. (2010).

Da análise conjunta dos valores dos referidos quadros, conclui-se que L3_Mk50 apresenta valores dentro dos intervalos dados para os 3 parâmetros, pelo que pode ser utilizado tanto para rebocos como para refechamento de juntas em edifícios antigos (Fig. 5.3). As argamassas L3, L2 e L1 apresentam valores aceitáveis face aos 3 parâmetros mecânicos mas apenas para utilização como rebocos. No entanto, e tendo em conta que a cura das argamassas estudadas foi bastante húmida de forma constante, para se obterem valores equivalentes, e desprezando a influência do ligante, teriam de ser tomadas em obra medidas que permitissem garantir a continuidade de uma cura húmida, pelo menos durante as primeiras semanas (por exemplo com aspersões sobre um geotêxtil mantido molhado e aplicado sobre o paramento).

A norma EN 998-1:2010 (CEN, 2010) especifica os requisitos das argamassas para rebocos definindo que, aos 28 dias, as argamassas para fins genéricos, devem pertencer às classes de resistência CS I – CS IV. Assim, estas argamassas devem apresentar valores de resistência à compressão superiores a 0,4 MPa, pelo que, aos 28 dias, só as argamassas L3 e L2 apresentam valores de R_C que não cumprem esta exigência (Fig. 5.4).

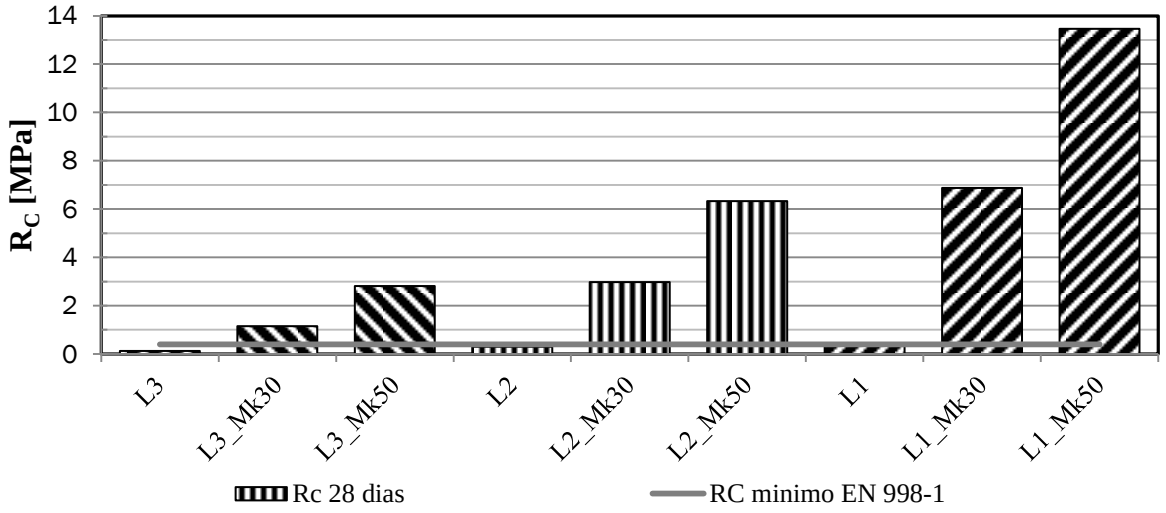

Figura 5.4 – R_C aos 28 dias das argamassas e valor mínimo indicado pela norma EN 998-1 (CEN, 2010).

5.1.1. Variação entre argamassas originais e de substituição

Apresentam-se no Quadro 5.5 os resultados de R_T e R_C das argamassas que foram inicialmente realizadas e posteriormente repetidas com ajuste da quantidade de água. Foram estas argamassas ditas de substituição que foram consideradas ao longo do trabalho.

No caso das argamassas L3 procedeu-se a uma redução da quantidade de água na argamassa de substituição, enquanto nas restantes argamassas procedeu-se a um aumento dessa quantidade (Quadro 4.2 do capítulo anterior). Esta variação da quantidade de água foi devida às razões referidas na secção 4.2.1.

Quadro 5.5 – Valores de R_T e R_C das argamassas originais e suas substituições.

Argamassa		L3		L3_Mk30		L3_Mk50		L1		L1_Mk30	
		28d	90d	28d	90d	28d	90d	28d	90d	28d	90d
R_T [MPa]	Original	0,18	0,21	0,15	0,08	0,44	0,28	0,22	0,52	1,98	2,00
	Subst.	0,08	0,24	0,59	0,16	1,09	0,58	0,30	0,44	2,07	1,33
R_C [MPa]	Original	0,23	0,39	0,45	0,48	2,53	0,99	0,53	0,98	8,96	11,13
	Subst.	0,13	0,41	1,16	0,81	2,82	1,89	0,45	0,68	6,88	5,55

Na figura 5.5 apresenta-se a variação das resistências das argamassas de substituição face às argamassas originalmente efetuadas devido à variação da relação Água/Ligante.

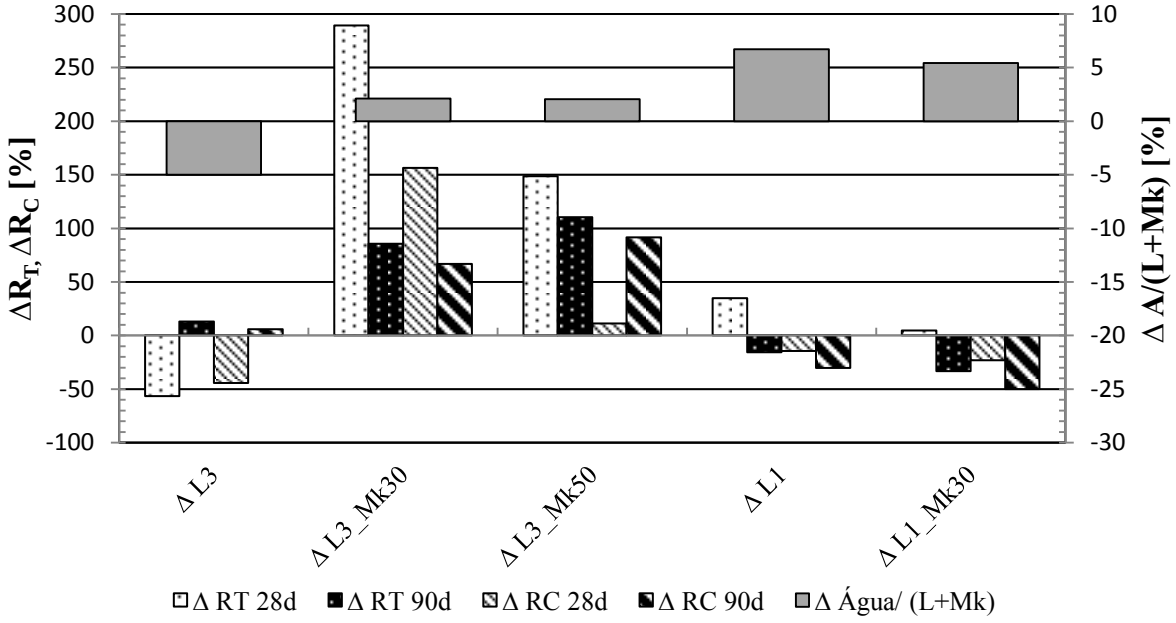

Figura 5.5 – Comparação da variação de R_T e R_C com a variação da quantidade de água de amassadura das argamassas originais e suas substituições.

Verifica-se que a diminuição da relação A/L em L3, conduziu a uma diminuição da resistência à tração por flexão e resistência à compressão aos 28 dias na ordem dos - 50%, não se verificando porém essa tendência aos 90 dias, idade para a qual a variação das características mecânicas variaram positivamente. Para L3_Mk30 e L3_Mk50 o aumento do rácio A/(L+MK) traduziu-se num aumento muito significativo de R_T e R_C em ambas as idades de ensaio (à exceção de ΔR_T 90 d cuja variação não teve a mesma proporção). Quanto às argamassas de traço volumétrico 1:1 (L1 e L1_Mk30), as quais foram as argamassas que apresentaram o aumento de A/(L+Mk) maior entre a argamassa original e a de substituição. O aumento do rácio, originou o abaixamento genérico das características mecânicas, à exceção de ΔR_T 28 d.

Nas secções seguintes procura-se justificar os valores das características mecânicas fora do expectável, cruzando-os com dados dos ensaios complementares.

5.1.2. Comparação de resistências entre argamassas sem adição de metacaulino

A figura 5.6 compara as características mecânicas das argamassas sem metacaulino aos 28 e 90 dias.

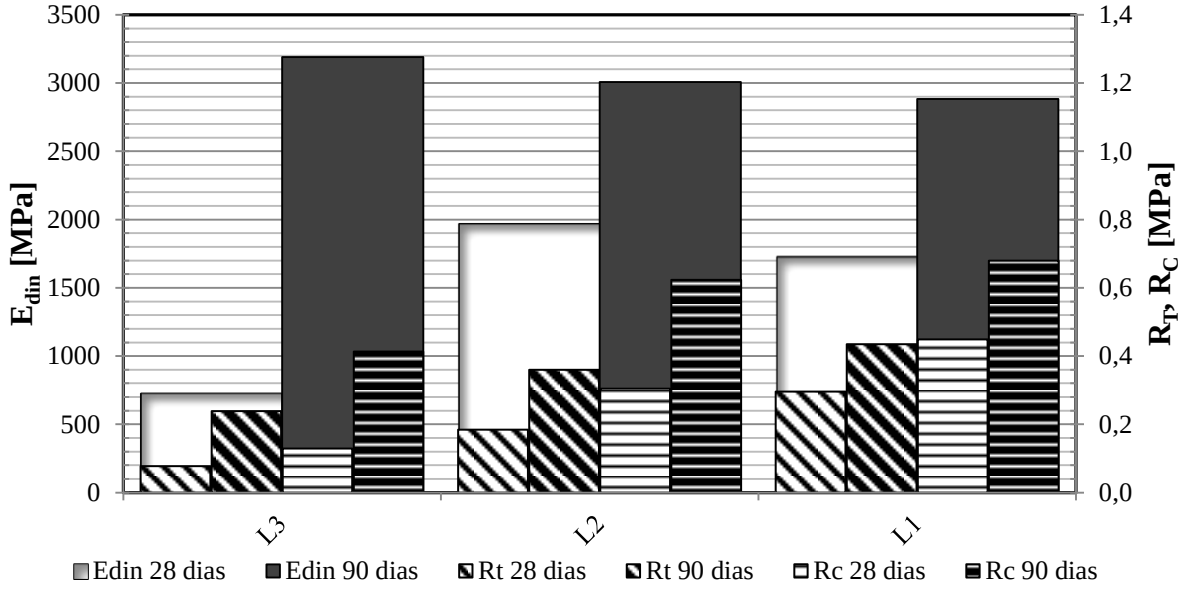

Figura 5.6 - Comparação das características mecânicas das argamassas sem metacaulino aos 28 e 90 dias.

A figura 5.7 apresenta o DRX das argamassas sem substituição parcial da massa de cal aérea por metacaulino.

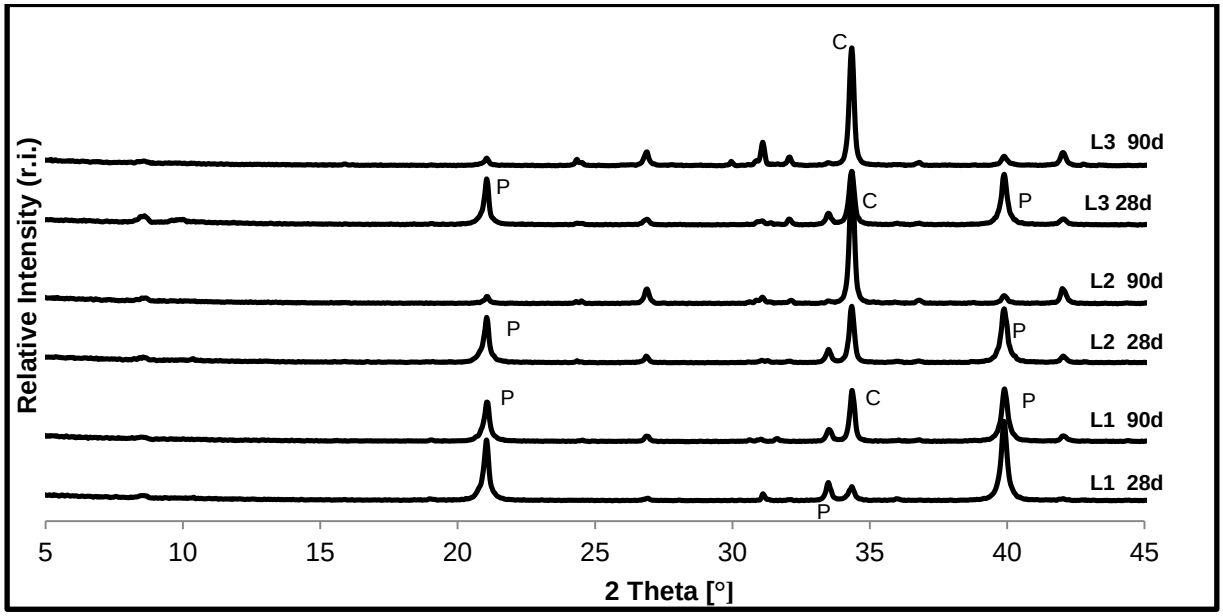

Figura 5.7 -DRX das argamassas sem substituição parcial de cal aérea por Mk aos 28 e 90 dias (GAMEIRO,2012).

A análise do gráfico da figura 5.6 indica um aumento das resistências mecânicas dos 28 para os 90 dias de todas as argamassas sem metacaulino.

No caso de R_T e R_C esse aumento verifica-se igualmente quando a análise é efetuada segundo o incremento de teor em ligante (para a mesma idade de ensaio),porém, essa tendência não se

verifica quando se comparam os valores de E_{din} das diferentes argamassas para a mesma idade de ensaio, ocorrendo, para os 28 dias, um decréscimo do módulo de elasticidade dinâmico de L2 para L1 e, aos 90 dias um decréscimo entre o valor de E_{din} de L3 e L2 e de L2 e L1. O facto dos valores de E_{din} de algumas das argamassas não apresentarem entre elas, a regularidade de aumento evidenciado para as outras características mecânicas (R_T e R_C) poderá dever-se à menor fiabilidade do próprio ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, uma vez que os valores obtidos de E_{din} podem ser significativamente afetados pela existência de humidade no interior do material (FARIA, 2004), podendo dessa forma justificar a ocorrência de valores.

De forma a detetar as causas da não verificação da referida tendência, analisa-se de seguida o DRX das argamassas sem substituição parcial da massa de cal aérea por metacaulino (na figura 5.7).

O DRX das argamassas sem adição de metacaulino (figura 5.7) revela uma menor taxa de carbonatação aos 90 dias da argamassa L1 comparativamente a L2 e L3, demonstrada pelo pico menor de calcite (C) quando comparado com o DRX das outras argamassas. Este fenómeno é acompanhado pela existência significativa de portlandite (P) livre aos 90 dias, traduzindo-se numa ligeiríssima redução face aos 28 dias. Tal situação sugere que a carbonatação desta argamassa decorre de forma consideravelmente mais lenta do que aquelas com traço volumétrico menor e consequentemente com menor quantidade de cal aérea, justificando dessa forma os baixos valores de E_{din} e R_C apresentados por L1 aos 90 dias face a L2.

FORTES REVILLA et al. (2006) refere que a exposição a cura muito húmida (>95 % de HR) não estimula o processo de carbonatação (pela elevada humidade existente na câmara e nos provetes, que pode em parte reduzir o acesso do CO_2); porém a figura 5.7 demonstra que uma cura com teor elevado de humidade relativa não impede que a reação de carbonatação ocorra quase totalmente até aos 90 dias em argamassas com uma quantidade de ligante de um terço ou metade da dos agregados a nível volumétrico. De facto, segundo Faria et al. (2011) uma cura húmida revela-se benéfica tanto para a hidratação dos componentes pozolânicos, como para o transporte de CO_2, indispensável para o processo de carbonatação.

5.1.3. Comparação de resistências entre argamassas com metacaulino

No caso das argamassas com metacaulino, inverte-se a tendência verificada para os valores de E_{din} das argamassas sem esta pozolana (fig. 4.2 do capítulo da análise e tratamento de resultados), ou seja, à exceção da argamassa L2_Mk30 todas as argamassas com Mk diminuíram o valor de E_{din} dos 28 para os 90 dias, sendo essa evolução mais significativa para as argamassas de traço volumétrico 1:3. Este fenómeno pode uma vez mais dever-se à pouca precisão dos valores obtidos no ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico enunciada anteriormente.

As situações particulares de variação das características mecânicas das argamassas com Mk serão analisadas nos próximos dois subcapítulos.

De forma a sustentar algumas das afirmações apresentadas nos próximos subcapítulos relativos à análise das características mecânicas das argamassas com Mk, apresentam-se de seguida gráficos ilustrativos da percentagem total de cal aérea consumida através da reação pozolânica e da reação de carbonatação (GAMEIRO, 2012).

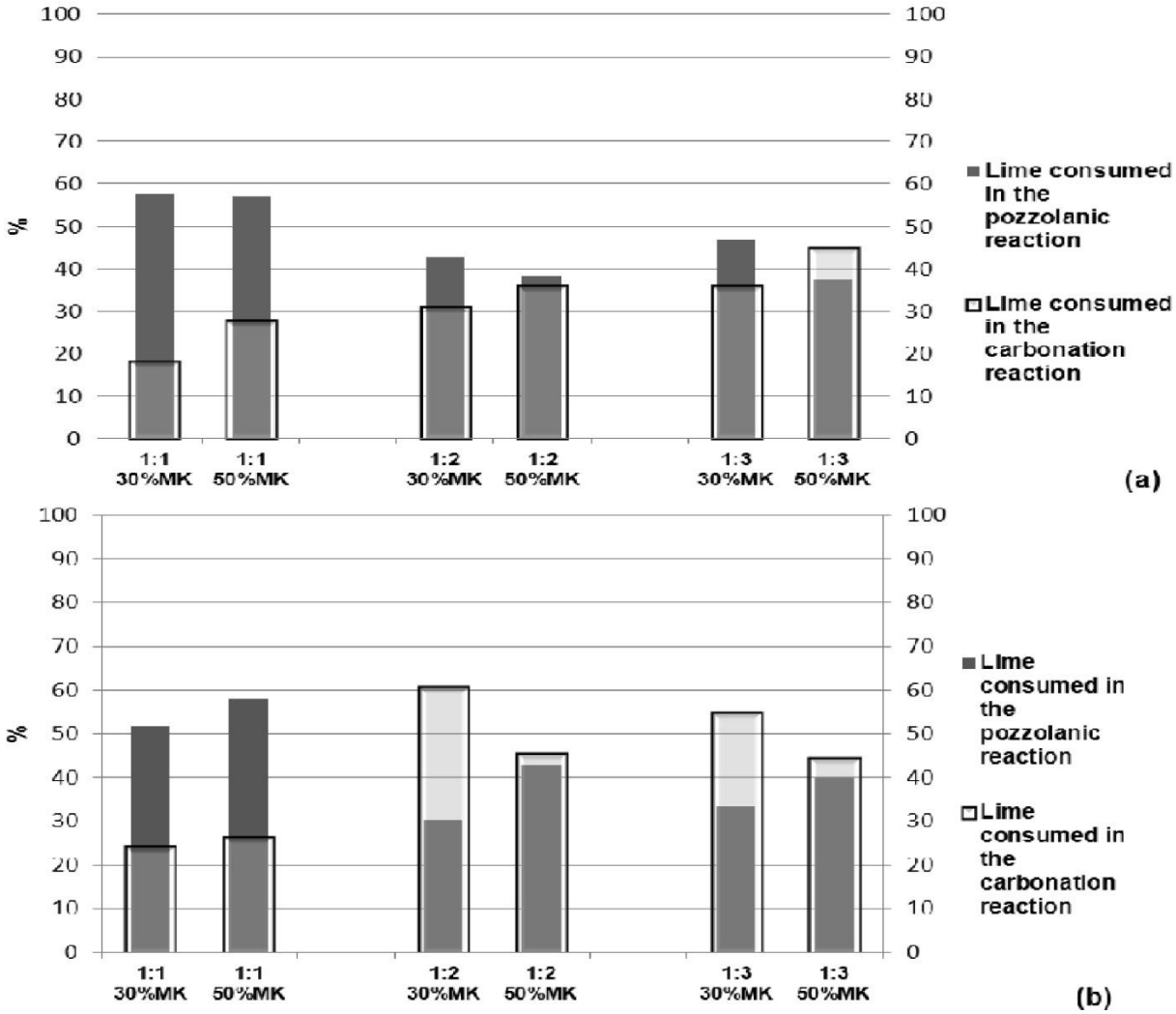

Figura 5.8 - Percentagem total de cal aérea consumida através da reação pozolânica e da reação de carbonatação (GAMEIRO, 2012).
(a) - 28 dias (b) – 90 dias.

A análise da figura 5.8 (a) revela um aumento da percentagem de cal aérea consumida por carbonatação com a diminuição da dosagem em ligante, aumentando igualmente com aumento do teor em metacaulino.

Na figura 5.8 (b), à exceção da argamassa L2_Mk30, ocorre um aumento da percentagem de cal aérea consumida por reação pozolânica, com o aumento do traço volumétrico. Esse aumento dá-se, também com o aumento da quantidade de cal aérea substituída por Mk para todas as 6 argamassas.

As argamassas L3_Mk30 L2_Mk30 aumentam consideravelmente a percentagem de cal consumida por carbonatação dos 28 para os 90 dias, acompanhada por um decréscimo não tão significativo da percentagem de cal consumida por reação pozolânica.

As argamassas de traço volumétrico 1:1 apresentam, para ambas as idades, grande predominância da reação pozolânica face à de carbonatação, quanto ao que ao consumo de cal diz respeito.

5.1.4. Comparação de resistências entre argamassas com 30% de teor em metacaulino

Tal como sucede para o valor de E_{din}, aos 90 dias, o valor de R_T da argamassa L2_Mk30 não decresceu fortemente face aos 28 dias. Por seu turno, os valores de R_T e R_C das argamassas L3_Mk30 e L1_Mk30 decrescem dos 28 para os 90 dias.

Para averiguar as causas das variações das resistências destas argamassas, apresenta-se na figura 5.9 e 5.10 os resultados, respetivamente do TG e DRX das argamassas com 30 % de Mk.

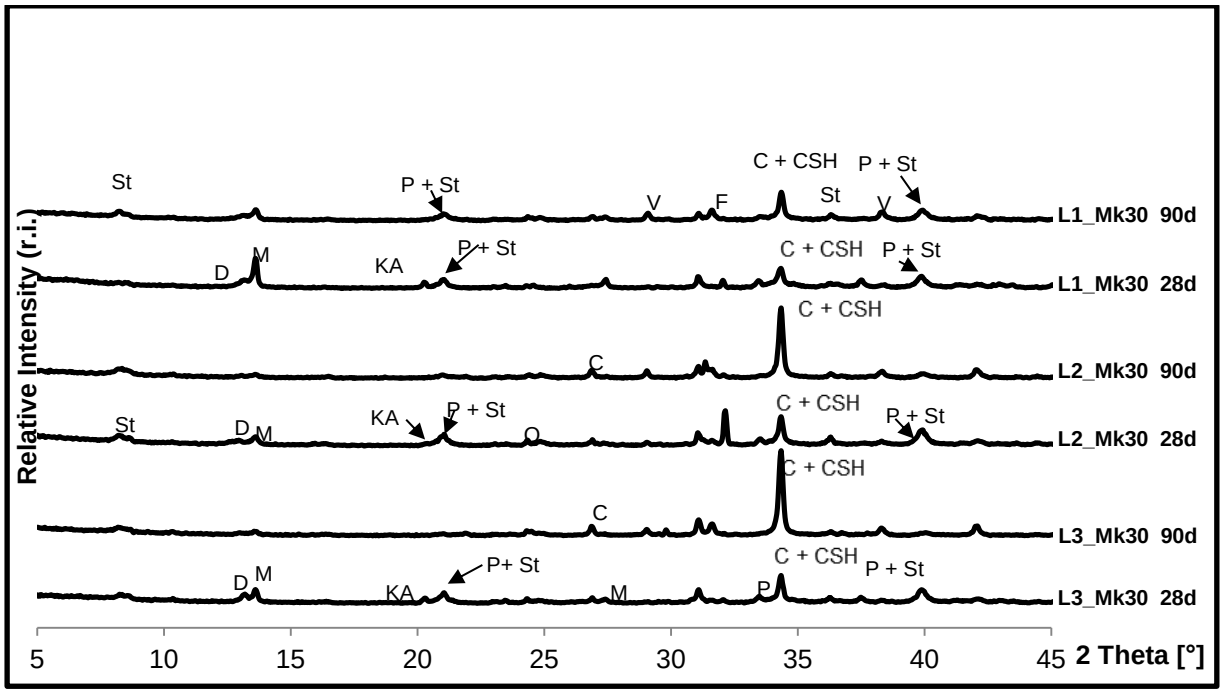

Figura 5.9 - DRX das argamassas com substituição de 30% da massa de cal por Mk aos 28 e 90 dias (GAMEIRO,2012).

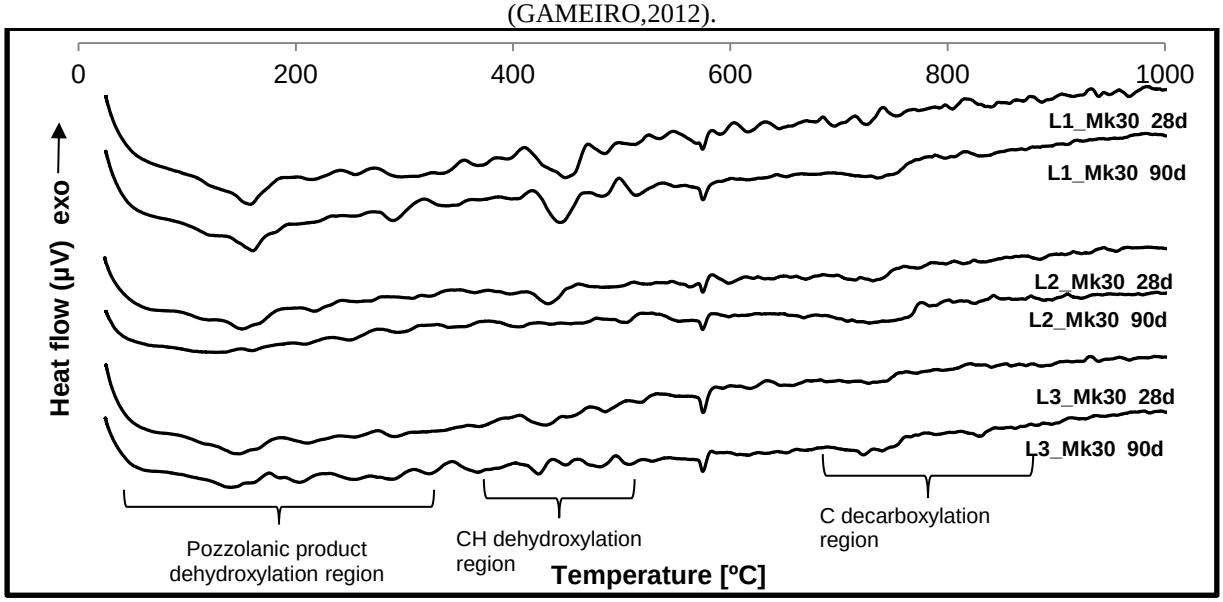

Figura 5.10 - TG das argamassas com substituição de 30% da cal por Mk aos 28 e 90 dias (GAMEIRO,2012).

Pela análise de DRX da argamassa L2_Mk30 (fig. 5.9), verifica-se que aos 28 dias estão formados diversos compostos hidráulicos resultantes da reação pozolânica como é o caso da stratlingite e que é corroborada pelo pico endotérmico a aproximadamente 150 °C que se deteta no TG da figura 5.10. Ainda para esta idade deteta-se uma inflexão no termograma (TG) de L2_Mk30 em torno dos 450 °C correspondente a portlandite (P) livre. Complementando a análise com a DRX e TG desta argamassa aos 90 dias, verifica-se que o pico da portlandite livre desapareceu, tendo surgido um pico endotérmico correspondente à formação de calcite (C) e verificada pelo aumento significativo do pico da calcite na DRX aos 90 dias desta argamassa. Esta análise revela que, aos 28 dias, a reação pozolânica de L2_Mk30 já ocorrera parcialmente, existindo porém ainda hidróxido de cálcio livre, o qual aos 90 dias foi consumido por carbonatação, originando a calcite. Os gráficos da figura 5.8 corroboram esta afirmação.

Um eventual ensaio das resistências mecânicas aos 60 dias poderia ajudar a despistar a tendência da variação das resistências mecânicas entre os 28 e 90 dias; porém a anterior análise indicia ter ocorrido um decréscimo após o cessar da reação pozolânica (que decorreu durante as primeiras semanas de cura) e um posterior aumento das resistências derivado da continuação da carbonatação da cal aérea.

As argamassas L3_Mk30 e L1_Mk30 foram transportadas para o LNEC para a realização dos ensaios de resistência à tração por flexão e de resistência à compressão aos 90 dias. Através da análise da DRX destas argamassas (fig. 5.10) verifica-se que aos 28 dias são detetáveis os picos relativos aos compostos que se desenvolvem com a reação pozolânica, tais como o monocarboaluminato (M) e o aluminato de cálcio hidratado (D), os quais diminuem substancialmente aos 90 dias. O DRX a esta idade (fig. 5.10) evidencia porém o aumento do pico relativo à formação de calcite (C). Este fenómeno sugere, para ambas as argamassas que o aumento da taxa de carbonatação dos 28 para os 90 dias expressa pelo aumento do pico da calcite, rompeu a microestrutura dos cristais dos produtos pozolânicos, resultando numa acentuada perda de resistências mecânicas.

De facto, os gráficos da figura 5.8 demonstram, nomeadamente para a argamassa L3_Mk30 um aumento da percentagem de cal aérea consumida por carbonatação de cerca de 20% (de 35 % para 55% do total de cal) entre idades, conjugado com uma diminuição da percentagem de cal aérea reagida por ação pozolânica da ordem dos 15 % (dos 50% para os 35%). Para a argamassa L1_Mk30, a variação das percentagens segue a mesma tendência de L3_Mk30, sendo a variação porém menor, na ordem dos 5% entre idades para ambas as reações.

5.1.5. Comparação de resistências entre argamassas com 50% de teor em metacaulino

Na figura 5.11 apresenta-se a comparação das resistências mecânicas das argamassas com 50% de metacaulino aos 28 e 90 dias.

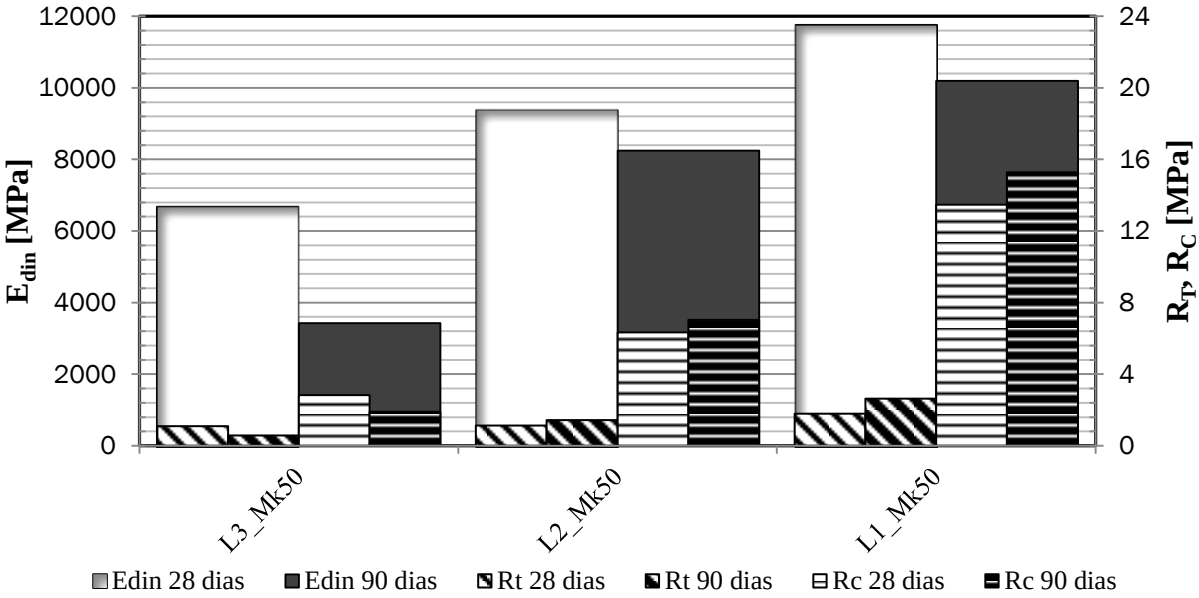

Figura 5.9 - Comparação das resistências mecânicas das argamassas com 50% de Mk aos 28 e 90 dias.

O Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas L2_Mk50 e L1_Mk50 diminui dos 28 para os 90 dias; porém essa diminuição é contrariada pelo aumento das resistências à tração por flexão e à compressão para o mesmo período de análise. Esta situação pode dever-se ao excesso de humidade presente nos poros dos provetes destas argamassas aos 28 dias de ensaio, conduzindo a um valor superior ao real de E_{din} a essa idade.

A perda de resistência à tração por flexão e de resistência à compressão da argamassa L3_Mk50 dos 28 para os 90 dias será abordada no subcapítulo seguinte.

5.1.6. Comparação de resistências entre argamassas de traço volumétrico 1:3

Apresentam-se na figura 5.12 os valores dos 3 parâmetros mecânicos aos 28 e 90 dias.

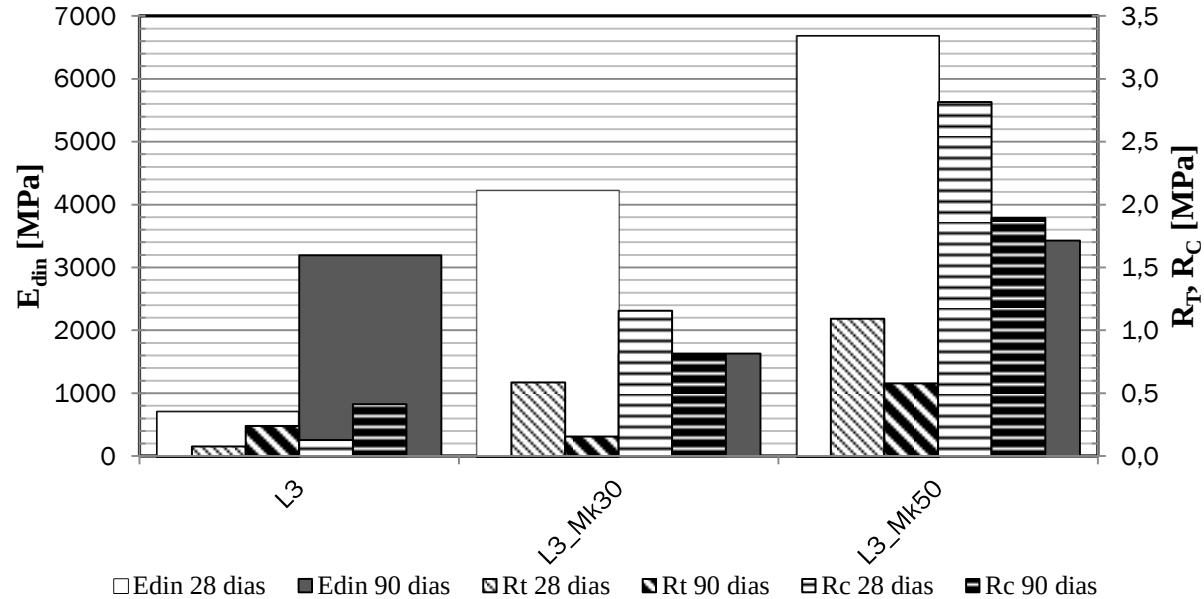

Figura 5.10 - Comparação das resistências mecânicas das argamassas de traço volumétrico 1:3 aos 28 e 90 dias.

Pela análise do gráfico comparativo de todas as características mecânicas ensaiadas aos 28 e 90 dias das argamassas de traço volumétrico 1:3 (figura 5.12), verifica-se que a redução significativa de E_{din} de L3_Mk30 e L3_Mk50 não se verifica à mesma escala para os valores de R_C, indiciando que os elevados valores de E_{din} aos 28 dias possam dever-se em grande parte ao facto das argamassas encontrarem-se ainda parcialmente húmidas, facto este que, como já mencionado anteriormente, tem influência sobre a determinação de E_{din} (FARIA, 2004).

A redução de R_T é, porém, significativa dos 28 para os 90 dias, pelo que proceder-se-á ao cruzamento dos registos da dTG (fig. 5.13) e de DRX (fig. 5.14) das argamassas deste traço volumétrico, de forma a indagar o que sucedeu no intervalo de tempo decorrido entre as duas idades.

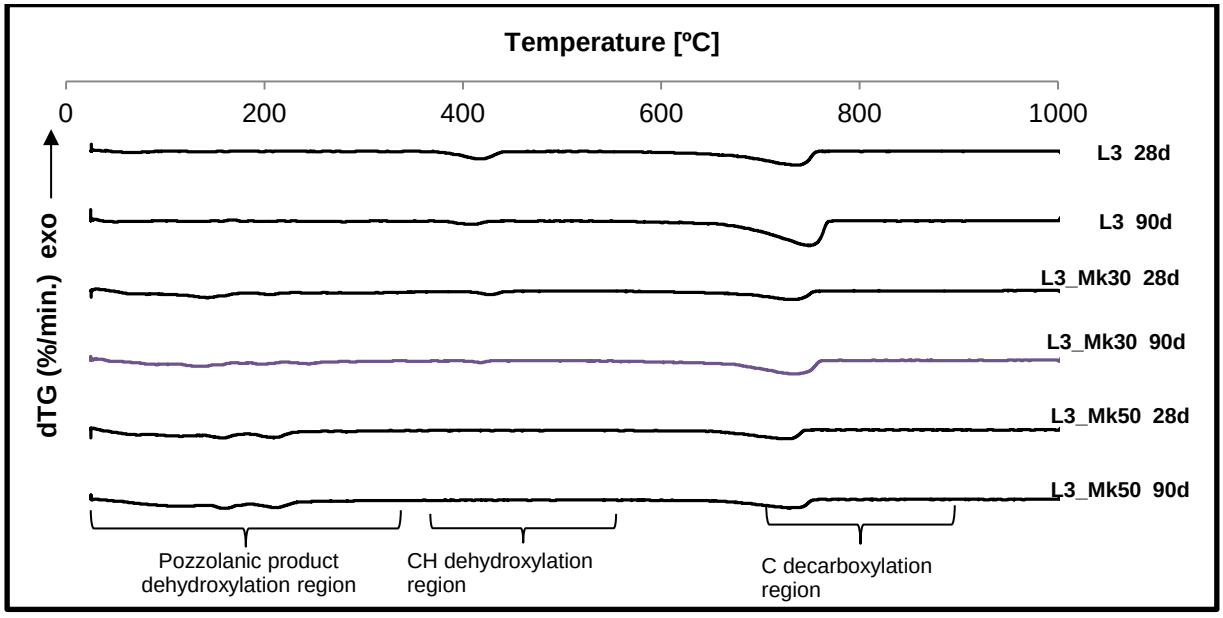

Figura 5.11 - dTG das argamassas de traço volumétrico 1:3 aos 28 e 90 dias.

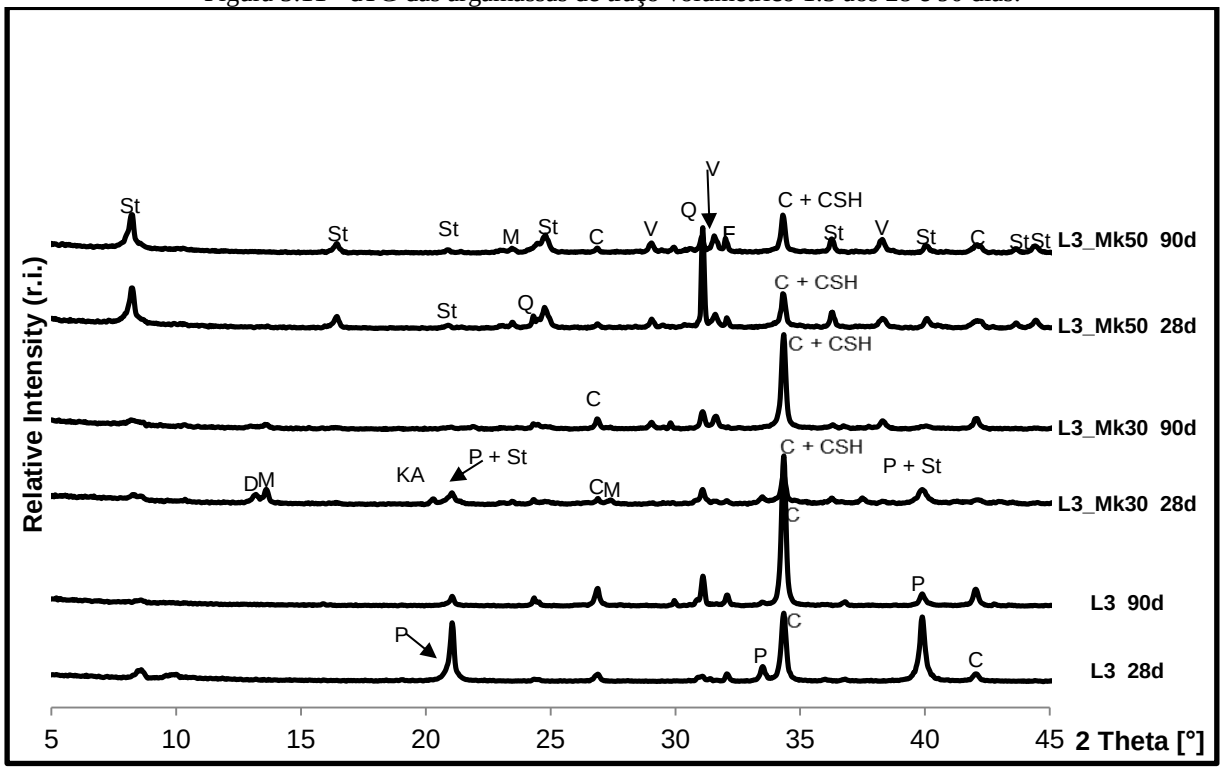

Figura 5.12 - DRX das argamassas de traço volumétrico 1:3 aos 28 e 90 dias (GAMEIRO,2012)

A análise do DRX da figura 5.14 revela que, aos 90 dias, a maioria dos compostos pozolânicos, que se haviam formado e que eram registados aos 28 dias na argamassa L3_Mk30, desapareceram. Aparece porém um pico relevante de calcite (C). O dTG desta argamassa revela aos 28 dias uma inflexão na gama de temperaturas da portlandite livre (~430ºC), que se atenua aos 90 dias, em contraponto com o aumento da variação do gráfico na gama de valores da descarboxilação da calcite (730ºC) dos 28 para os 90 dias.

A figura 5.8 indica, para a argamassa L3_Mk50 que a variação da percentagem total de cal aérea que se consumiu quer por reação pozolânica, quer por carbonatação, foi praticamente nula, ocorrendo inclusive um ligeiro aumento da percentagem relativa à reação pozolânica aos 90 dias. Porém, a diminuição da percentagem total de cal consumida por reação pozolânica da argamassa L3_Mk30 foi de cerca de 15% (de 50% para 35% aos 90 dias). Essa diminuição está associada ao aumento, em cerca de 20 %, da quantidade total de cal que reagiu por carbonatação aos 90 dias para esta argamassa.

De resto, as três argamassas de traço volumétrico 1:3 foram submetidas a ensaios de R_T e R_C aos 90 dias no LNEC estando assim expostas à mesma condição de cura. A análise do DRX da argamassa L3_Mk50 revela um ligeiro decréscimo da quantidade de produtos pozolânicos existentes nos provetes aos 90 dias face aos 28 dias, nomeadamente do Quartzo (Q), o constituinte principal das areias siliciosas, e um ligeiro aumento da calcite (C), confirmada pelo aumento do pico endotérmico do dTG desta argamassa (~730 ºC). No caso da argamassa L3 verifica-se, com o prolongamento da cura, uma diminuição do pico aos ~430 ºC correspondente à desidroxilação do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), aumentado porém o pico endotérmico da calcite. Confirma-se assim a ocorrência de uma forte carbonatação desta argamassa durante este período e como de resto era expectável.

5.1.7. Comparação entre as Características Mecânicas de L3 e AH (FELGUEIRAS, 2011)

Neste subcapítulo comparam-se as argamassas de traço volumétrico 1:3 sem Mk, utilizando o mesmo agregado e ligante e sujeitas à mesma condição de cura húmida, realizadas pelo autor com as realizadas por Felgueiras (2011). Os resultados são apresentados graficamente na figura 5.15.

Importa ressalvar que à exceção da argamassa AH (FELGUEIRAS, 2011), a qual é a nível constitutivo e de cura idêntica a L3, todas as restantes argamassas estudadas pelo autor têm teores diferentes de metacaulino e distintos traços Ligante:Agregado, não sendo por isso comparáveis com as argamassas analisadas nesta dissertação.

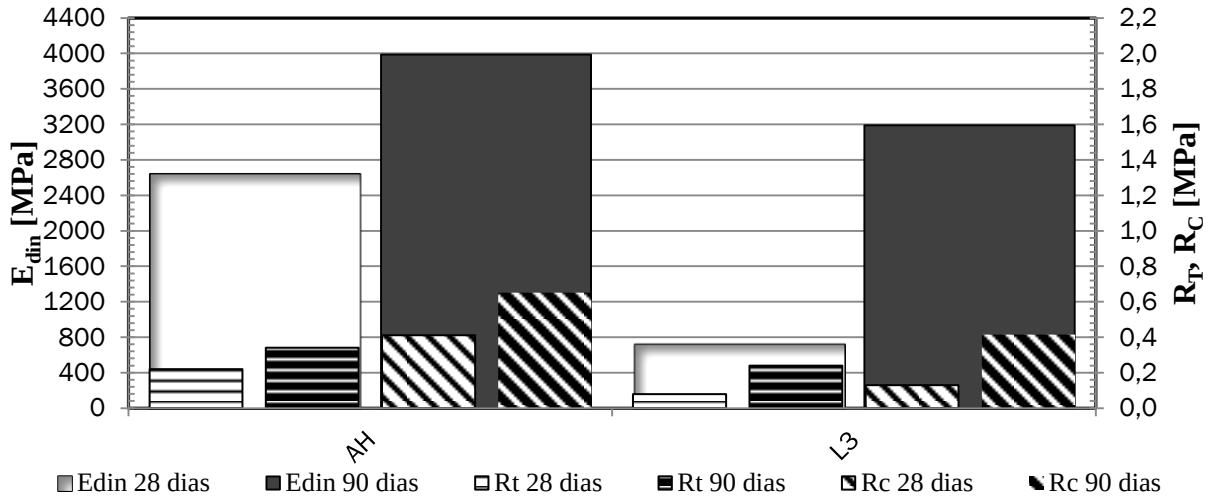

Figura 5.13 - Comparação de E_{din}, R_T e R_C aos 28 e 90 dias das argamassas L3 com AH (FELGUEIRAS, 2011).

A argamassa AH de Felgueiras (2011) apresenta aos 28 dias um E_{din} cerca de 4 vezes superior aos da L3; porém aos 90 dias, os E_{din} de L3 e de AH são já mais aproximados. Mais uma vez a grande disparidade de valores pode ter origem no elevado teor de humidade dos provetes aos 28 dias de idade.

Comparativamente com AH os valores de R_C de L3 são inferiores: 1/3 aos 28 dias e 2/3 aos 90 dias (como se verificou para R_T).

5.2. COMPORTAMENTO FACE À ÁGUA

5.2.1. Características de absorção capilar

A análise da figura 4.7 do capítulo referente à análise e tratamento de resultados, indica que as argamassas sem metacaulino - L3, L2, L1- são aquelas que apresentam os Valores Assimptóticos, mais baixos segundo a ordem apresentada, tanto para os 28 como para os 90 dias de ensaio. Assim, é possível concluir que a adição de metacaulino à matriz do ligante confere um efeito negativo à argamassa quanto à absorção total de água por capilaridade, permitindo que esta absorva maior volume de água por unidade de superfície. O aumento do traço, mais forte em ligante, induz igualmente um aumento do volume total de água absorvida; porém não revela ser tão preponderante quanto a adição da pozolana.

Segundo Faria et al. (2008) argamassas de cal aérea sem adições apresentam valores elevados de Coeficiente de Capilaridade (CC) mas Valores Assimptóticos (VA) não tão elevados. No presente estudo, verificou-se a veracidade desta afirmação quanto à gama de valores de CC, sendo possível porém acrescentar que, comparando apenas as três argamassas sem metacaulino, quanto maior for o valor do CC dessas argamassas, mais elevado será também o seu Valor Assimptótico. No que concerne aos resultados dos Valores Assimptóticos, verifica-se para ambas as idades que L3, L2 e

L1 são pela ordem indicada as argamassas que menos quantidade total de água absorvem entre as nove argamassas analisadas. Em relação ao Coeficiente de Capilaridade, apenas L1 se quantifica em ambas as idades entre as argamassas com o valor de CC mais elevado. O aumento do teor em ligante nas argamassas sem metacaulino conduz assim a um aumento do Coeficiente de Capilaridade e do Valor Assimptótico. Excetuando o CC de L2, ambos os parâmetros aumentam os seus valores dos 28 dias para os 90 dias de idade.

Segundo Velosa (2006), é desejável que argamassas para reboco possuam um baixo Coeficiente de Capilaridade, associado a uma baixa absorção de água. A substituição parcial de cal aérea por metacaulino não constitui uma boa solução face à absorção capilar, uma vez que desponta um aumento do VA face à argamassa sem metacaulino com o mesmo traço volumétrico. Porém, o metacaulino permite uma redução efetiva do CC face a argamassas do mesmo traço volumétrico sem metacaulino. Esta redução é tanto maior (a nível percentual) quanto maior for o teor em ligante das argamassas.

A norma EN 998-1:2010 (CEN, 2010) indica 3 gamas de valores aceitáveis de Coeficiente de Capilaridade de argamassas para rebocos. Para aplicação genérica não existe limitação específica, porém só a argamassa L3_Mk50 apresenta aos 28 dias, um CC dentro dos valores possíveis para aplicação da argamassa como reboco exterior de uma camada e com boas características térmicas (W1: CC $\leq$ 0,40 kg/m²·min^{0,5}).

Veiga et al. (2010) indicam que argamassas de revestimento ou de refechamento de juntas devem apresentar valores de CC entre os 1,0-1,5 kg/m^2.min.^{0,5}; as argamassas que apresentam valores de CC dentro desta gama são: aos 28 dias, L3_Mk30, L3_Mk50, L2 e L1; aos 90 dias, L3, L3_Mk50 e L2.

5.2.1.1. **Variação entre argamassas originais e de substituição**

No quadro 5.6 apresentam-se os valores de Coeficiente de Capilaridade e dos Valores Assimptóticos das argamassas originais e suas substituições aos 28 e 90 dias. Na Figura 5.16 apresenta-se a variação dos parâmetros do ensaio de absorção capilar das argamassas de substituição face às argamassas originalmente efetuadas devido à variação da relação Água/Ligante.

Quadro 5.6 - Valores de CC e VA das argamassas originais e suas substituições.

Argamassa		**L3**		**L3_Mk30**		**L3_Mk50**		**L1**		**L1_Mk30**	
		28d	**90d**	**28d**	**90d**	**28d**	**90d**	**28d**	**90d**	**28d**	**90d**
CC [kg/m^2.min^{0,5}]	**Original**	1,19	0,86	1,56	1,38	1,15	1,28	1,93	1,96	0,41	0,73
	Subst.	0,84	1,14	1,20	1,61	1,06	1,15	1,48	1,77	0,73	0,92
VA (kg/m²)	**Original**	17,2	18,1	22,8	24,1	24,9	26,2	21,2	21,7	25,0	25,3
	Subst.	15,9	17,8	23,3	26,8	24,9	26,5	21,2	23,0	27,0	28,8

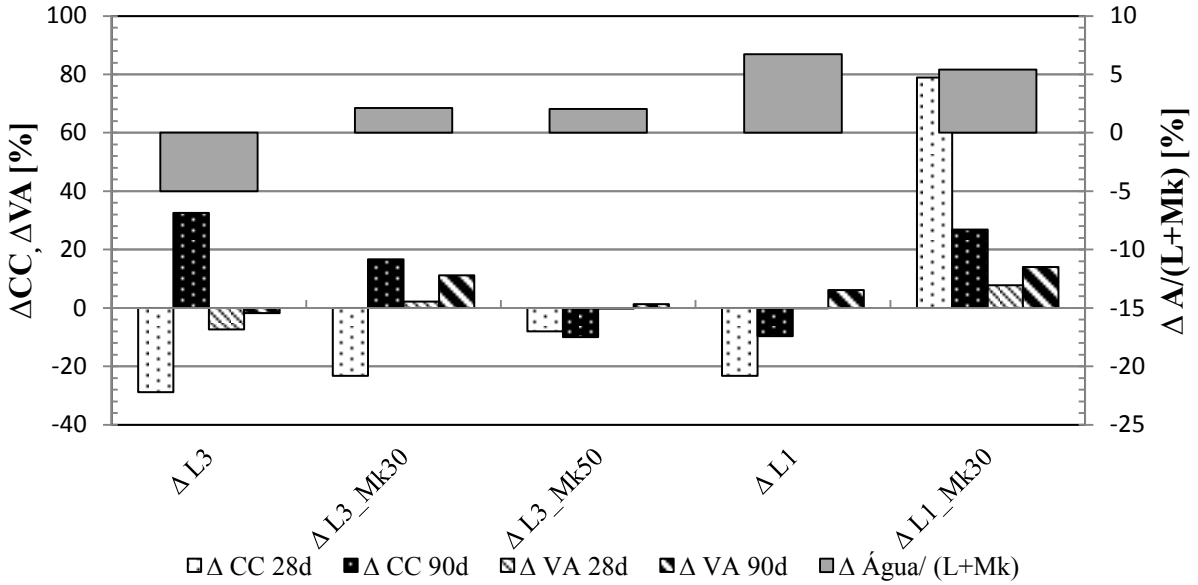

Figura 5.14 - Comparação da variação de CC e VA com a variação da quantidade de água de amassadura entre argamassas originais e suas substituições.

No que concerne a variação dos parâmetros obtidos através do ensaio de absorção capilar, depara-se com uma diminuição do Coeficiente de Capilaridade aos 28 dias das argamassas L3, L3_Mk30, L3_Mk30 e L1, em paralelo com um aumento para L1_Mk30 de cerca de 80% (0,4 para 0,7 $kg/m^2.min.^{0,5}$) do valor registado para a argamassa de substituição em relação à original. Aos 90 dias, a tendência registada anteriormente inverte-se no caso das argamassas L3 e L3_Mk30, a variação entre as 2 amassaduras foi no sentido do aumento do CC. Não é possível traçar uma correlação entre a variação de água de amassadura e a variação do Coeficiente de Capilaridade.

A variação dos Valores Assimptóticos entre as 2 amassaduras das mesmas argamassas revela menor disparidade percentual do que o verificado para o CC. A variação deste parâmetro é maior aos 90 dias de ensaio e para as argamassas L3_Mk30, L1 e L1_Mk30. Para o caso deste parâmetro, parece haver uma relação direta com a variação de A/(L+Mk), uma vez que a variação de VA foi negativa para a argamassa onde ocorreu diminuição da relação Água /Ligante – L3 - e houve um aumento do valor máximo de absorção capilar (VA) das amassaduras para as quais fez-se aumentar o rácio de A/(L+Mk).

5.2.1.2. **Comparação entre as curvas de Absorção Capilar de L3 e AH (FELGUEIRAS,2011)**

O ensaio de determinação da absorção capilar foi realizado tanto para os 28 dias como para os 90 dias utilizando meios provetes, porém as metades não são exatamente iguais uma vez que a rutura transversal do provete decorrente do ensaio de tração por flexão não se verifica rigorosamente a meio do comprimento do provete. Deriva deste facto os valores de VA serem, aos 28 dias, cerca de metade dos registados por Felgueiras (2011) para a mesma idade, uma vez que este usou provetes inteiros para realizar este ensaio à referida idade. No entanto o autor também refere a ocorrência de alguma perda de material dos provetes, que de algum modo poderia "mascarar" os resultados. De

forma a serem comparáveis, os valores medidos no ensaio de absorção capilar para a argamassa AH 28 dias* por Felgueiras (2011) foram divididos por 2. Na figura 5.17 comparam-se as curvas de absorção capilar de L3 com a argamassa AH (FELGUEIRAS, 2011) aos 28 e 90 dias.

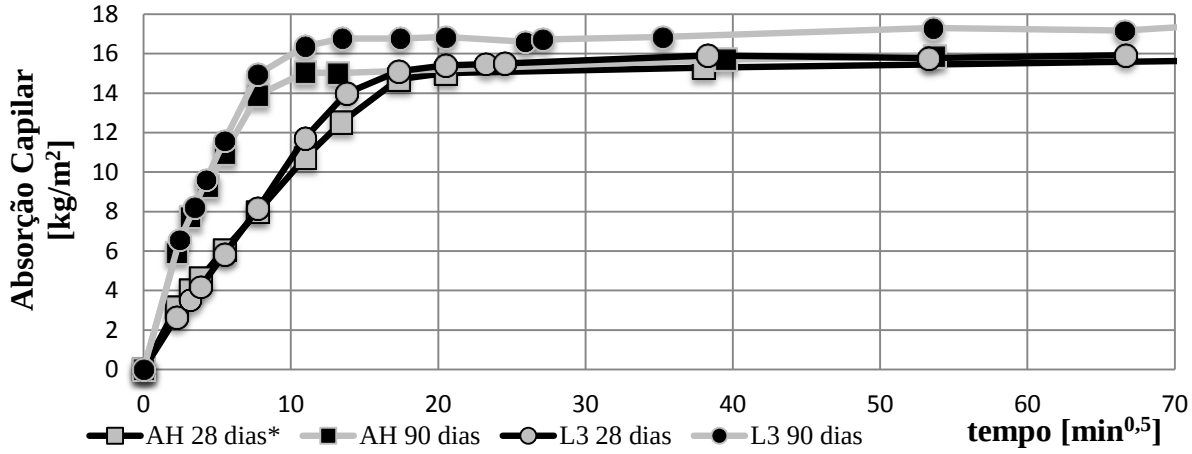

Figura 5.15 - Comparação das curvas de absorção capilar aos 28 e 90 dias das argamassas L3 e AH (FELGUEIRAS, 2011)

Analisando a figura 5.17, verifica-se que as argamassas apresentam valores muito semelhantes de Coeficiente de Capilaridade para a mesma idade de estudo.

O tempo que cada argamassa necessita para atingir o patamar de saturação é igualmente equivalente entre as argamassas com a mesma idade.

No que concerne o Valor Assimptótico, a argamassa AH (FELGUEIRAS, 2011) apresenta valores semelhantes aos 28 e 90 dias; porém, o VA de L3 sofre um acréscimo de aproximadamente 2 kg/m^2 dos 28 para os 90 dias.

5.2.2. Características de secagem

O Índice de Secagem é inversamente proporcional à facilidade com que decorre a evaporação de água das argamassas (FARIA et al.,2012a). Dessa forma pode-se concluir, em especial para os 90 dias, que a introdução parcial de metacaulino faz aumentar o Índice de Secagem das argamassas, pelo que não constitui solução melhor que as argamassas só com cal aérea. A Taxa de Secagem (TS), por sua vez, traduz a velocidade inicial de secagem.

As argamassas L3_Mk30 e L3_Mk50 apresentam a melhor combinação dos 3 parâmetros: elevada Taxa de Secagem, baixo valor de Índice de Secagem e grande variação total da massa de água.

5.2.2.1. **Variação entre argamassas originais e de substituição**

No quadro 5.7 expõe-se os valores da Taxa de Secagem das argamassas originais e suas substituições às duas idades de estudo. Na figura 5.18 apresenta-se a variação da TS das argamassas de substituição face às argamassas originalmente efetuadas devido à variação da relação Água/Ligante.

Quadro 5.7 - Valores de TS das argamassas originais e suas substituições.

Argamassa		L3		L3_Mk30		L3_Mk50		L1		L1_Mk30	
		28d	90d	28d	90d	28d	90d	28d	90d	28d	90d
TS [kg/m^2.h]	Original	0,35	0,173	0,33	0,157	0,20	0,05	0,31	0,128	0,41	0,139
	Subst.	0,44	0,164	0,46	0,160	0,45	0,145	0,41	0,152	0,46	0,169

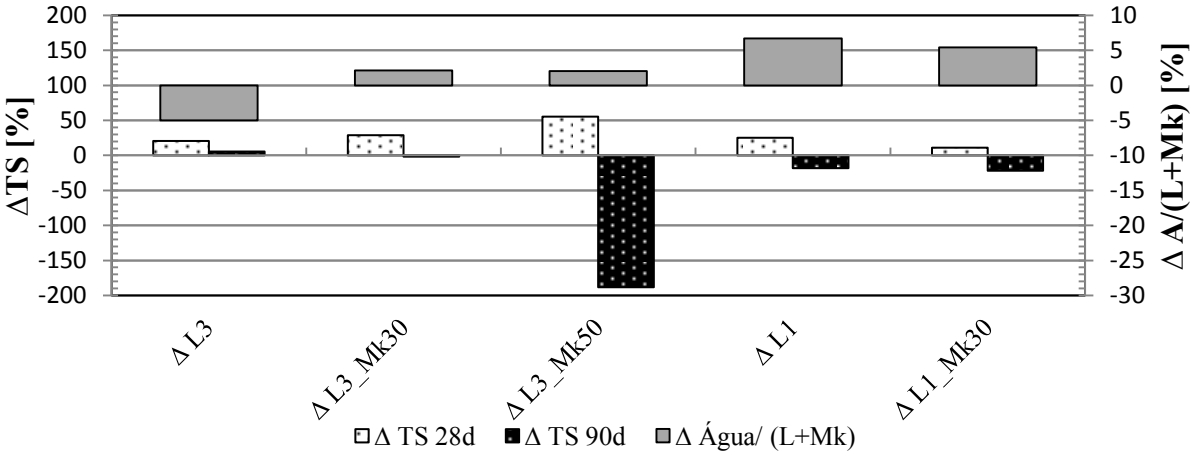

Figura 5.16 - Comparação da variação de TS com a variação da quantidade de água de amassadura entre argamassas originais e suas substituições.

A figura 5.18 revela que independentemente do sentido da variação de A/(L+Mk), a variação da Taxa de Secagem aos 28 dias foi sempre positiva.

As duas argamassas de L3_Mk50 apresentam variações contrastantes entre idades: aos 28 dias é a maior variação positiva, sofrendo uma diminuição de cerca 180% entre a argamassa de substituição e a original aos 90 dias. Aos 90 dias, apenas ΔL3 apresenta um aumento de TS.

5.2.2.2. **Comparação entre as curvas de Secagem de L3 e AH (FELGUEIRAS, 2011)**

Na figura 5.19 representa-se graficamente as curvas de secagem das argamassas L3 e AH (FELGUEIRAS, 2011) aos 28 e 90 dias.

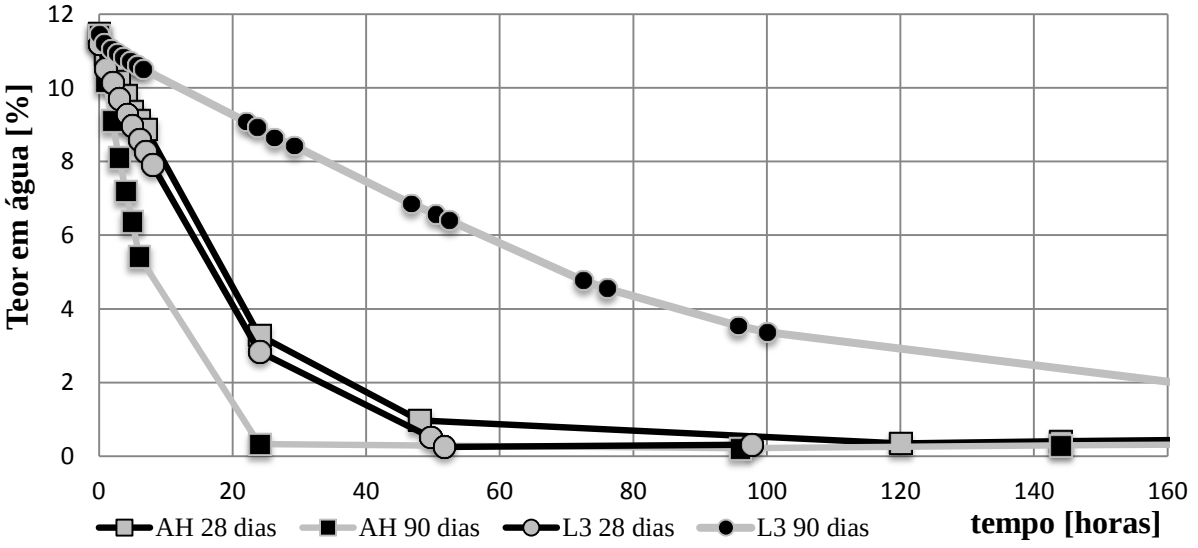

Figura 5.17 -Comparação das curvas de secagem aos 28 e 90 dias das argamassas L3 e AH (FELGUEIRAS, 2011).

O procedimento do ensaio de secagem usado por Felgueiras (2011) é idêntico ao utilizado na campanha experimental aos 28 dias de ensaio mas distinto do utilizado aos 90 dias, este motivo, justifica o comportamento diferente registado pelas duas argamassas aos 90 dias de ensaio.

A comparação entre as curvas de secagem de L3 e AH (FELGUEIRAS, 2011) revela que a progressão das curvas de secagem é idêntica entre as duas argamassas aos 28 dias de ensaio (cujos procedimentos são equivalentes), traduzindo-se em declives da tangente à curva às primeiras horas de ensaio semelhantes. Os valores iniciais e finais do teor de água [%] são igualmente idênticos. Relativamente aos 90 dias a comparação não é fidedigna uma vez que aos 90 dias, a incorporação da película lateral reduziu substancialmente a velocidade inicial do ensaio tendo prolongado por conseguinte a duração do ensaio.

5.2.3. Relação entre secagem e absorção capilar

Segundo Faria et al. (2008), os efeitos de um valor elevado de absorção capilar podem ser compensados por uma boa capacidade de evaporação de água, através de permeabilidade ao vapor de água. Apesar de não ter sido realizado no âmbito desta dissertação o ensaio de permeabilidade ao vapor de água, será utilizada a Taxa de Secagem obtida através do ensaio de Secagem das argamassas como indicador da velocidade de evaporação (não forçada) de água inicial e este valor será comparado ao valor do Coeficiente de Capilaridade dessas argamassas, através da figura 5.20.

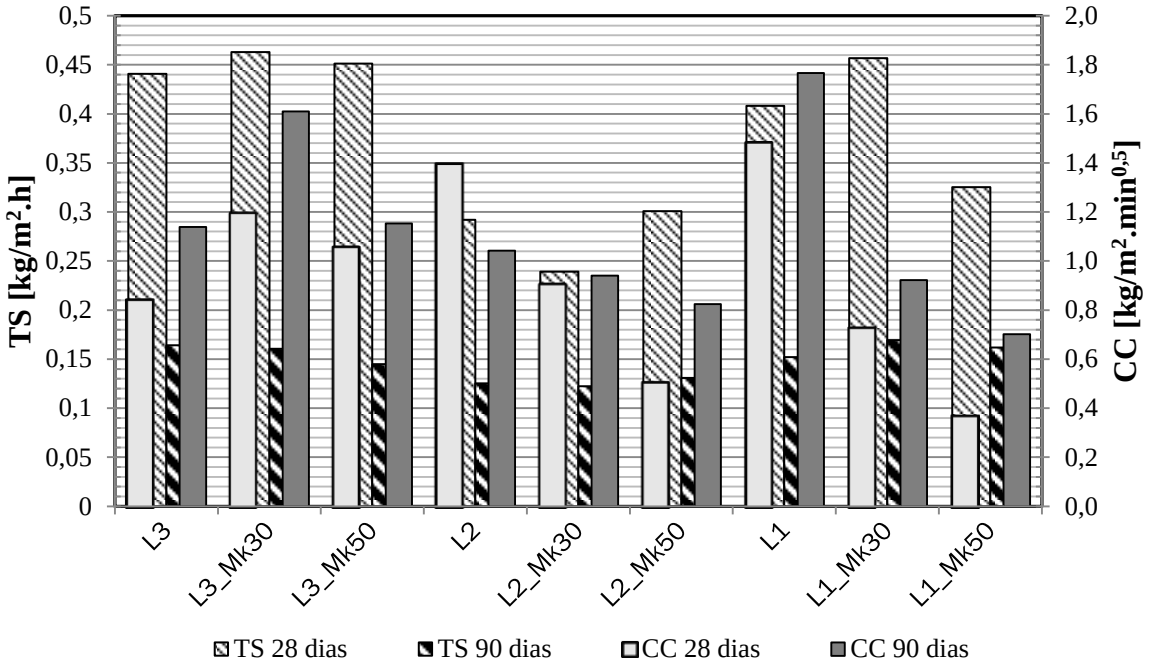

Figura 5.18 - Comparação entre Coeficiente de Capilaridade e Taxa de Secagem aos 28 e 90 dias de idade de todas as argamassas.

Nas figuras 5.21 e 5.22 são representadas em conjunto, respetivamente para os 28 e 90 dias, as curvas de absorção capilar e de secagem de todas as argamassas.

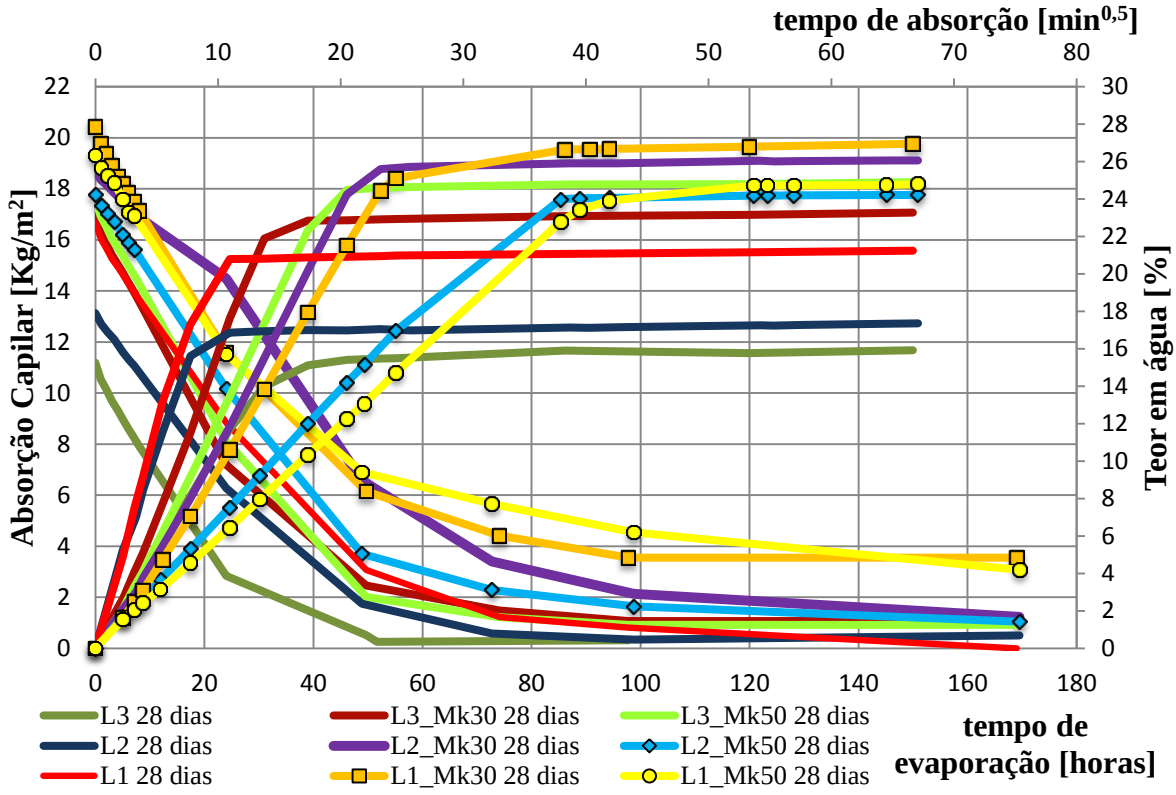

Figura 5.19 - Curvas de secagem e de absorção capilar de todas as argamassas aos 28 dias.

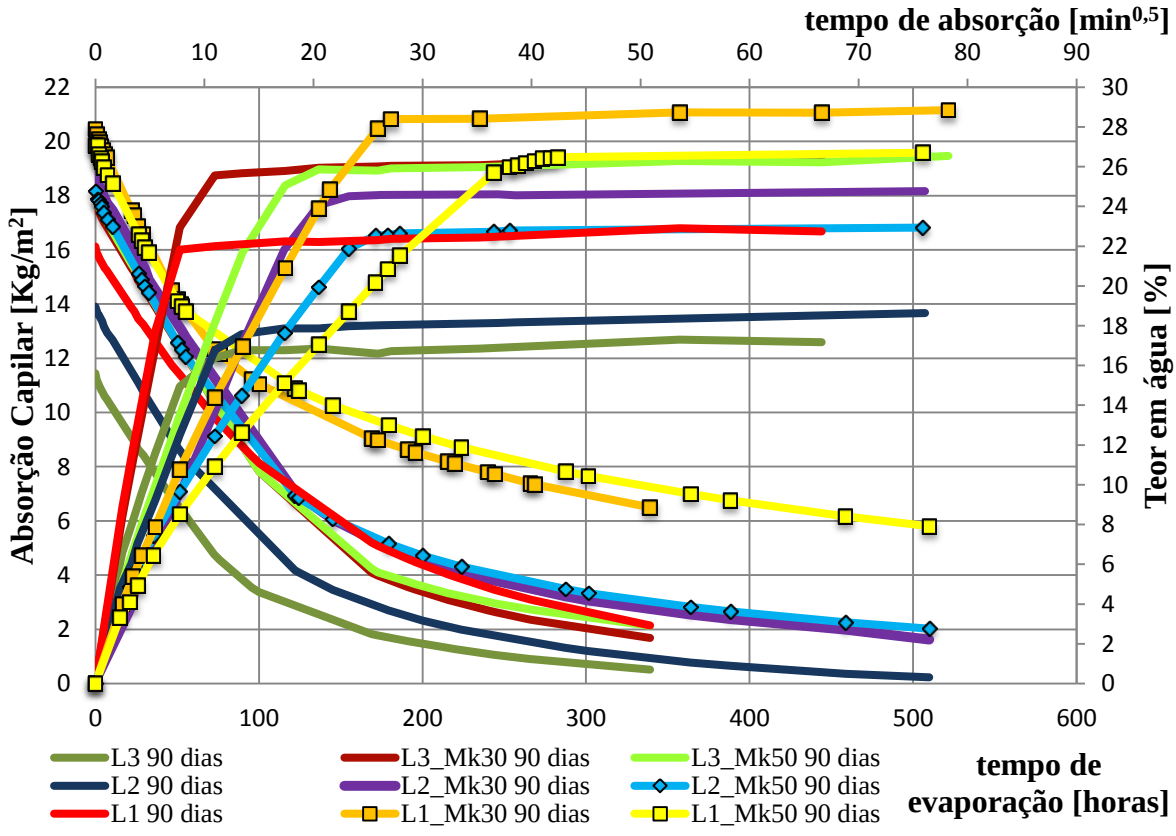

Figura 5.20 - Curvas de secagem e de absorção capilar de todas as argamassas aos 90 dias.

A análise da figura 5.20 indica que a Taxa de Secagem decresce abruptamente dos 28 para os 90 dias, provando que a impermeabilização lateral dos meios provetes tem maior influência sobre a capacidade de secagem por evaporação do que a capacidade de absorção capilar desses meios provetes.

A interpretação do gráfico da figura 5.20 revela que, aos 28 dias de idade, as argamassas L2 e L1 demonstram uma capacidade deficitária de evaporação de água comparativamente à de absorção, o que porém não é revelado por L3 - que a par das restantes argamassas com traço volumétrico 1:3 demonstra uma velocidade de evaporação inicial elevada. As argamassas com maior traço volumétrico e maiores teores em metacaulino (L1_Mk30 e L1_Mk50) apresentam melhor comportamento face ao binómio baixo Coeficiente de Capilaridade e elevada Taxa de Secagem inicial; porém, como será discutido de seguida, não revelam ter os melhores comportamentos globais de secagem e absorção capilar.

A análise conjunta da evolução das curvas de secagem e de absorção capilar da figura 5.21 e 5.22 permite comparar os tempos totais de secagem e de absorção capilar, mas essencialmente comparar o tempo que uma argamassa demora até atingir o patamar de saturação com o declive da curva de secagem (maior ou menor facilidade de evaporação).

Para o binómio analisado, interessa que as argamassas apresentem valores baixos de Coeficiente de Capilaridade e elevados de Taxa de Secagem.

A rápida absorção capilar e evaporação revelada pelas argamassas L1 e L2 e L3 (argamassas só com cal aérea como ligante) poderão dever-se ao processo de endurecimento inicial das argamassas durante o qual podem ter-se formado fissuras originadas por retração, tal como descrito por Rato (2006). As propriedades hidráulicas conferidas pela introdução parcial do metacaulino permitem atenuar os fenómenos de retração inicial.

Por outro lado, e apesar de apresentarem valores baixos de CC e elevados de TS, as argamassas com os traços volumétricos mais fortes em ligante (1:1) e teores elevados de metacaulino (30% e 50%) apresentam os maiores valores de VA e/ou períodos superiores de absorção capilar e de secagem, pelo que revelam os piores comportamentos face à secagem e absorção capilar.

A argamassa L1_Mk50 apresenta, tanto para os 28, como para os 90 dias, o período de tempo maior até atingir o Valor Assimptótico, bem como o declive de tangente à curva de secagem menor, que se traduz num período mais prolongado de secagem.

A argamassa L1_Mk30 evidência períodos de secagem e declives de tangente à curva de secagem idênticos aos de L1_Mk50; porém o seu comportamento face à absorção capilar de água é ligeiramente diferente, uma vez que demora menos tempo a atingir um Valor Assintótico superior a L1_Mk30, ou seja, revela ser a argamassa com pior comportamento face conjuntamente à secagem e à absorção capilar.

A argamassa L2_Mk50 apresenta um período de tempo até atingir o patamar de saturação idêntico a L1_Mk50 aos 28 dias e semelhante a L1_Mk30 aos 90 dias; porém revela ser a argamassa

com melhor comportamento quanto ao binómio CC-VA, uma vez que apresenta um baixo Coeficiente de Capilaridade aliado a um Valor Assimptótico dentro da média das 9 argamassas.

5.3. ESTRUTURA POROSA

5.3.1. Porosidade aberta

Tal como descrito no capítulo 3 - Desenvolvimento Experimental - aos 90 dias as argamassas de traço volumétrico 1:3 foram ensaiadas envoltas em collants de nylon, de forma a conter a perda de material das amostras durante a fase de imersão e manuseamento no ensaio – perda essa que havia ocorrido para o ensaio aos 28 dias, como demonstra a figura 5.23.

Figura 5.21 -Partículas de argamassa suspensas na água e depositadas no fundo do recipiente durante o ensaio de Porosidade aberta aos 28 dias.

5.3.1.1. **Comparação entre os valores de Porosidade aberta de L3 e AH (FELGUEIRAS, 2011)**

Na figura 5.24 apresenta-se a Pab das argamassas L3 e AH (FELGUEIRAS, 2011).

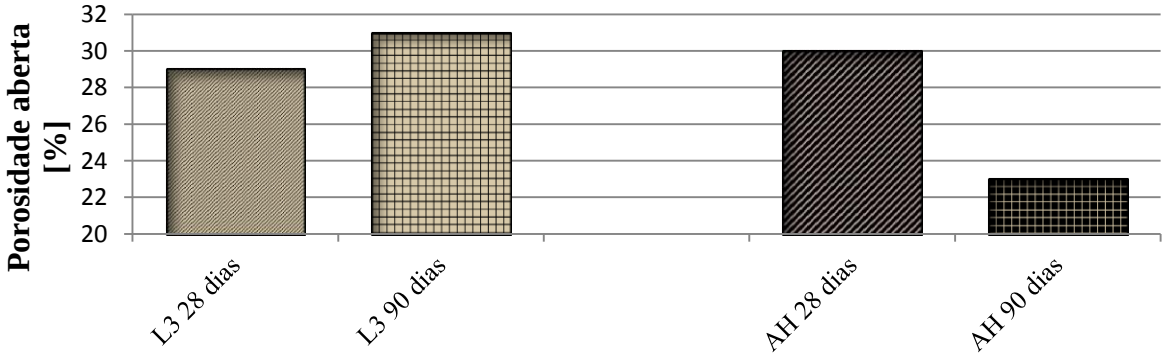

Figura 5.22 - Comparação entre os valores de Porosidade aberta aos 28 e 90 dias de L3 E AH (FELGUEIRAS, 2011).

A análise do gráfico 5.24 indica que os valores das duas argamassas aos 28 dias, os quais seguiram a mesma metodologia de ensaio, são concordantes. Esta situação não se verifica para o ensaio aos 90 dias, uma vez que a tendência de evolução do parâmetro é inversa, isto é, ocorre um

aumento de cerca de 2% da Pab da argamassa L3 aos 90 dias em relação aos 28 dias, contrariando o verificado por Felgueiras (2011), o qual verificou um decréscimo significativo da Pab dos 28 para os 90 dias de ensaio de 7 %. No entanto, tem-se conhecimento que houve uma perda de massa significativa no decorrer do ensaio de Felgueiras (2011), pelo que a comparação pode não fazer sentido.

Sendo a porosidade aberta o resultado duma fração cujo numerador é a subtração entre a massa da amostra saturada e a massa da amostra seca e o denominador a diferença entre a massa da amostra saturada e a massa da amostra imersa, o aumento do valor de L3 entre as idades de ensaio pode ser justificado pelo facto da aplicação do collant (90 dias) garantir que a perda de massa é menor, a nível percentual, do que no caso de não se usar o collant (28 dias), levando à alteração dos valores tanto do numerador como do denominador de forma não necessariamente proporcional.

5.3.1.2. **Variação entre argamassas originais e de substituição**

O quadro 5.8 apresenta os valores de Pab das argamassas originais e suas substituições aos 28 e 90 dias. Por sua vez, na figura 5.25 procede-se à verificação que a variação da relação A/(L+Mk) induz sobre a Pab aos 28 e 90 dias das argamassas de substituição face às argamassas originais.

Quadro 5.8 - Valores de Pab das argamassas originais e suas substituições.

Argamassa		**L3**		**L3_Mk30**		**L3_Mk50**		**L1**		**L1_Mk30**	
		28d	**90d**	**28d**	**90d**	**28d**	**90d**	**28d**	**90d**	**28d**	**90d**
Pab [%]	**Original**	31	25	32	29	31	31	31	27	33	31
	Subst.	29	31	33	36	33	36	32	34	36	33

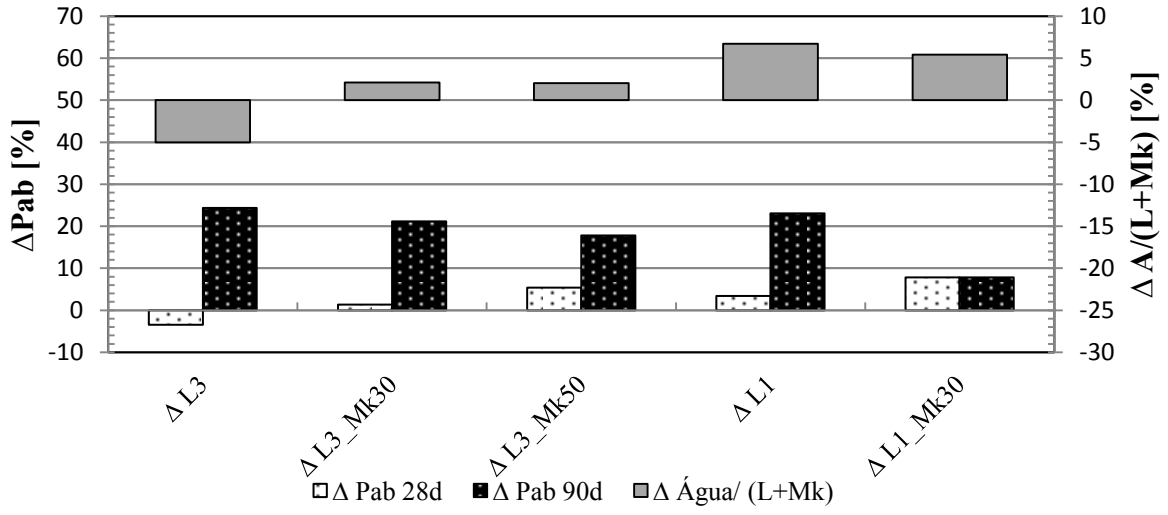

Figura 5.23 - Comparação da variação de CC e VA com a variação da quantidade de água de amassadura entre argamassas originais e suas substituições.

No capítulo da variação da Porosidade aberta, o ajuste da quantidade de água de amassadura apresenta um sentido de variação concordante entre Δ A/ (L+Mk) e ΔPab, isto é, ocorreu um aumento da Porosidade aberta entre as 2 amassaduras da mesma argamassa quando o rácio Água / Ligante aumentou. No caso de ΔL3, a diminuição percentual da quantidade de água de amassadura provoca

uma diminuição da Pab aos 28 dias e um grande aumento deste parâmetro aos 90 dias, sendo inclusive a maior variação verificada entre as 5 argamassas repetidas.

5.3.2. Relação entre Porosidade Aberta e Valor Assimptótico

O Valor Assimptótico é a quantidade máxima de água que um provete pode absorver por capilaridade. Se o volume de poros abertos (espaços interligados do material) aumentar, é espectável que o volume total de água absorvível e que ocupe essa maior quantidade de espaço, aumente.
Na figura 5.26 comparam-se os valores da Porosidade aberta e do Valor Assimptótico das argamassas para os 28 e 90 dias.

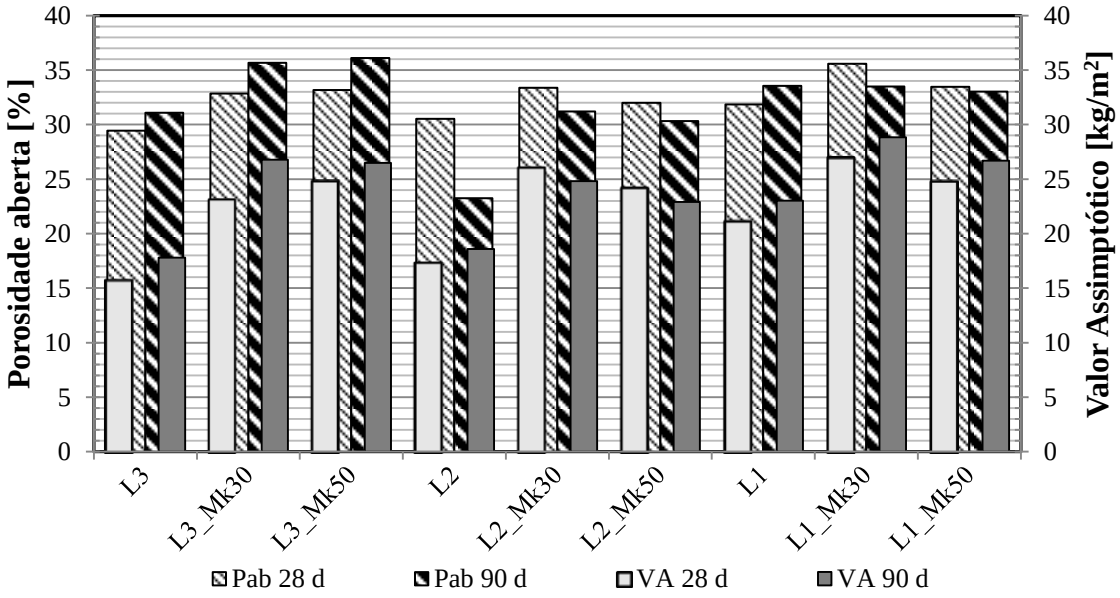

Figura 5.24 - Comparação entre os valores de Pab e VA aos 28 e 90 dias de idade de todas as argamassas.

A figura 5.26 revela uma tendência de proporcionalidade entre a evolução dos dois parâmetros para ambas as idades. No caso das argamassas sem metacaulino (exceto L2) e nas argamassas de traço volumétrico 1:3, o aumento da Porosidade aberta conduz a um aumento do Valor Assimptótico dessas argamassas. A proporcionalidade mantém-se para as argamassas de traço volumétrico 1:2; porém, ambos os parâmetros diminuem os seus valores dos 28 para os 90 dias. Como indicado em 4.4.6, o valor de Pab de L2 aos 90 dias é excessivamente baixo (admitindo-se que possa ter ocorrido uma anomalia durante o ensaio), não sendo conclusiva a evolução deste parâmetro entre idades. No caso das argamassas L1_Mk30 e L1_Mk50 essa relação não se verifica, ocorrendo um decréscimo da Porosidade aberta dos 28 para os 90 dias. A análise da figura 5.8 revela para ambas as idades uma predominância de consumo de cal aérea por reação pozolânica em detrimento da reação de carbonatação. Como indicado no subcapítulo 2.7, Tziotziou et al.(2011) atestam que a formação de diversas fases de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (C-S-H) no interior do espaço poroso do provete, durante o endurecimento, modifica, entre idades, características tais como a porosidade

aberta, a distribuição e o tamanho dos poros. Este fenómeno pode constituir a explicação para as tendências inversas de evolução de Porosidade aberta e Valor Assimptótico dos 28 para os 90 dias.

5.3.3. Condutibilidade térmica

Os resultados deste ensaio são, tal como indicado no capítulo dedicado à descrição do desenvolvimento experimental, pouco fidedignos em termos de valores absolutos, uma vez que a sonda de superfície usada foi circular e os meios provetes analisados têm face rectângular com dimensão inferior ao diâmetro da sonda, de forma que a sonda não se encontrava totalmente em contacto com o meio provete. Os valores podem apenas ser analisados segundo uma perspetiva de comparação entre eles ou com outros valores obtidos em provetes de geometria idêntica.

Nesta análise, os melhores resultados obtidos (valores mais baixos) de condutibilidade térmica foram registados para as argamassas com adição de metacaulino (30% e 50%), com a menor proporção de ligante face ao agregado (traço volumétrico 1:3).

Tal como indicado por Cerny et al. (2006) a inclusão do Mk conduz a uma redução da condutibilidade térmica das argamassas de cal aérea+Mk. Esta melhoria é aparentemente consequência do facto do metacaulino ser um material mais poroso comparativamente à cal aérea, o que altera a microestrutura das argamassas.

5.3.4. Relação entre Porosidade Aberta e Condutibilidade Térmica

Segundo Vejmelkova et al. (2012) é possível estabelecer uma correlação entre a Porosidade aberta e a Condutibilidade térmica de uma argamassa à base de cal aérea com ou sem metacaulino. A autora obteve valores mais baixos de Pab e mais elevados de Condutibilidade térmica pra as argamassas com Mk e o oposto para as argamassas sem Mk, tal como ilustra o quadro 5.9, no qual a sigla dos materiais iniciada pela sigla "L" indica argamassas de cal aérea com 20 % de substituição de massa substituída por metacaulino e a sigla "C", correspondente a argamassas só de cal aérea.

Material	λ (W/m.K)	Pab (%)
LMM	0,664	33,9
LMS	0,706	35,7
LMV	0,726	35,4
LMC	0,731	33,2
LRM	0,650	38,5
CV	0,290	50,2
CS	0,366	47,3

Quadro 5.9 -Valores de Condutibilidade térmica (à esq.) e Porosidade aberta (à dir.) obtidos por Vejmelková et al. (2012).

Na figura 5.27 faz-se uma comparação, por recurso a um gráfico de colunas, dos valores de Porosidade aberta (aos 90 dias) e condutibilidade térmica das nove argamassas estudadas.

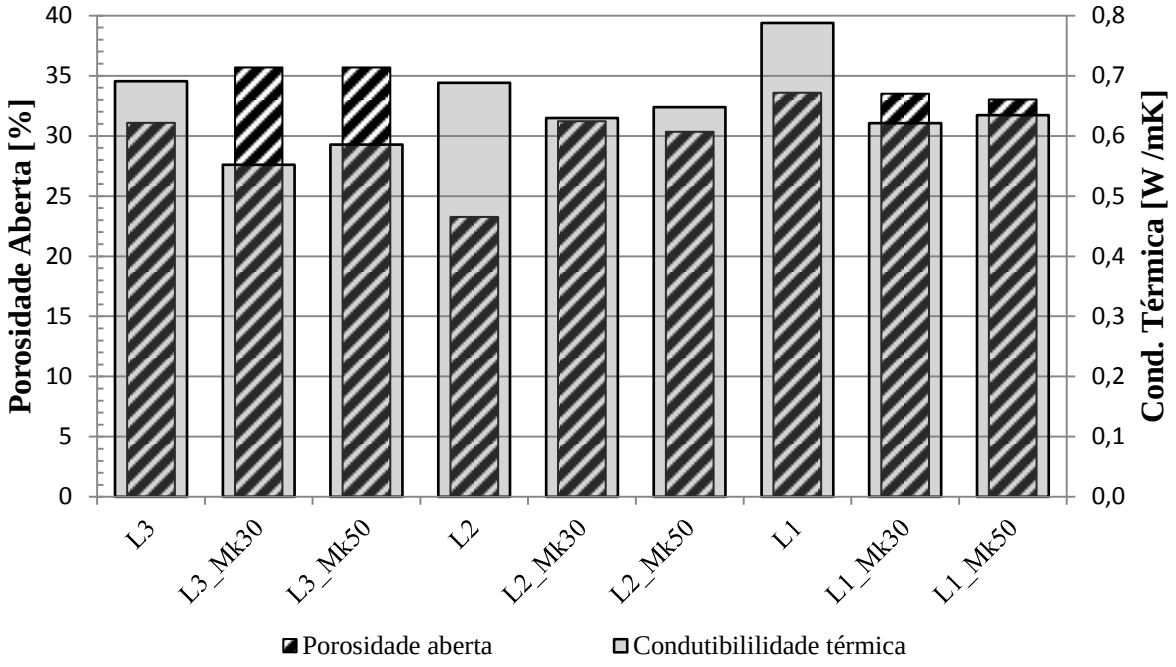

Figura 5.25 - Comparação dos valores de Porosidade Aberta aos 90 dias com os de Condutibilidade Térmica.

Apesar de ter sido possível verificar uma tendência inversa de desenvolvimento destes parâmetros físicos, esta decorreu de forma contrária à identificada por Vejmelková et al. (2012). Na tentativa de estabelecer uma correlação entre a Porosidade aberta e a Condutibilidade térmica obteve-se uma tendência inversa de desenvolvimento destes parâmetros consoante o tipo de argamassa em análise (com substituição parcial por Mk ou não), ou seja, no estudo efetuado na FCT-UNL obtiveram-se os maiores valores de condutibilidade térmica e menores de Porosidade aberta para as argamassas de cal aérea sem metacaulino (nomeadamente L3 e L2[6]) e os valores mais baixos de Condutibilidade térmica e maiores de Porosidade aberta para as argamassas com metacaulino, ou seja, o oposto ao apresentado por Vejmelková et al. (2012), e exposto no quadro 5.9.

O facto do ensaio de porosidade ter sido efetuado aos 90 dias de idade e o de condutibilidade térmica apenas aos 135 dias, apesar da análise decorrer sobre os meios provetes que estiveram em cura húmida até aos 90 dias de idade, pode tornar a comparação pouco fidedigna. Com efeito, no periodo decorrido entre os 90 e os 135 dias os provetes foram sujeitos a ensaios de capilaridade e secagem e permaneceram em condições de cura a 65% de HR; durante esse período continuou a decorrer a cura dos provetes e pode ter havido alteração da estrutura porosa. Esse factor pode ter influência na disparidade de resultados descrita no parágrafo anterior.

[6] Valor excessivamente baixo como referido no parágrafo 4.4.6.

5.4. COMPORTAMENTO FACE AOS SULFATOS, RESISTÊNCIAS MECÂNICAS E ESTRUTURA POROSA

Na figura 5.28 e 5.29 apresenta-se, respetivamente para os 28 e 90 dias de ensaio, uma comparação gráfica entre as resistências à compressão e tração por flexão, a porosidade aberta das argamassas, e a variação de massa por ação dos sulfatos correspondente, ao 7º ciclo de secagem/imersão.

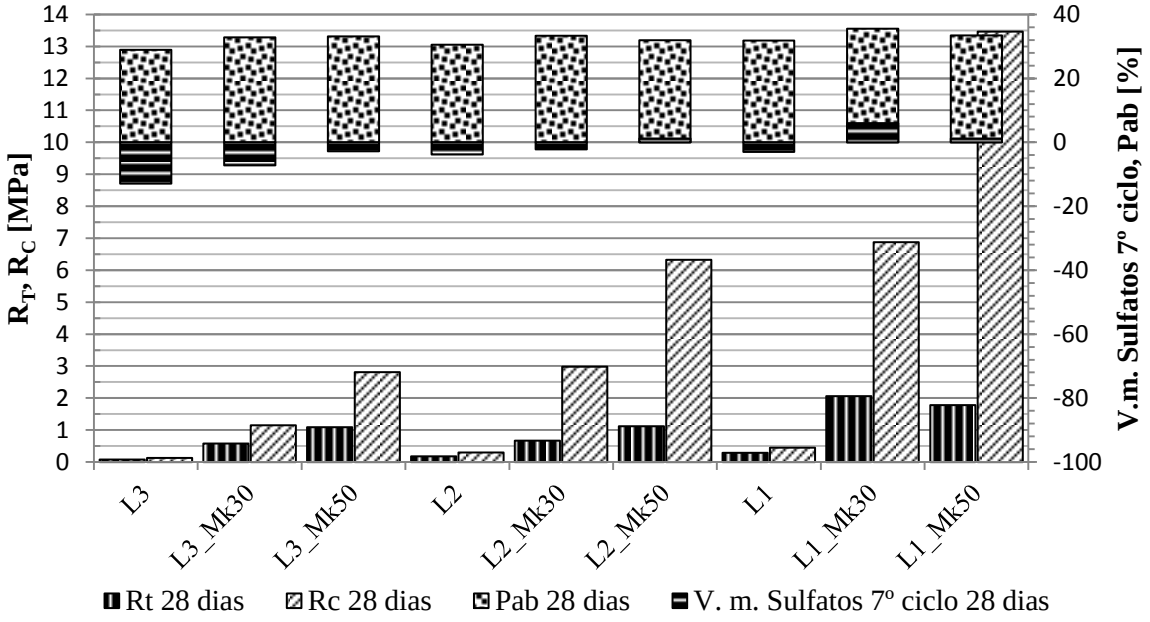

Figura 5.26 - Resistências mecânicas, porosidade aberta e variação de massa das argamassas ao 7º ciclo aos 28 dias.

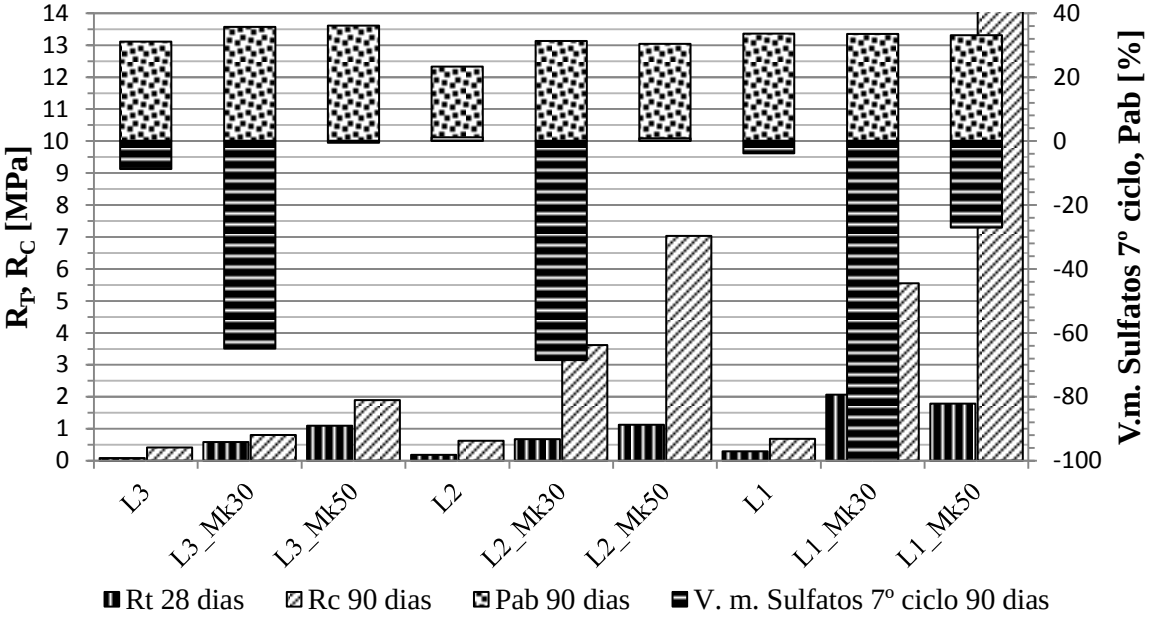

Figura 5.27 - Resistências mecânicas, porosidade aberta e variação de massa das argamassas ao 12º ciclo aos 90 dias.

A análise da figura 5.28 (28 dias) demonstra, nomeadamente para o conjunto das argamassas com traço volumétrico 1:3 e 1:2, uma tendência de aumento da resistência ao ataque dos sulfatos

(entenda-se menor perda de massa total ao 7º ciclo) com o aumento das resistências mecânicas (tanto de R_T como R_C); porém essa tendência não se verifica para as argamassas ensaiadas aos 90 dias, cujos resultados apresentam-se na figura 5.29. Aos 90 dias, tal como indicado no capítulo 4, são as argamassas com 30 % de Mk que apresentam maior perda de massa sem que, contudo, haja uma relação direta com a evolução dos outros parâmetros comparativos.

A argamassa com menor valor de Pab é aquela que apresenta menor variação de massa no ensaio aos 28 dias; porém, parece não existir uma relação direta entre a porosidade aberta e a resistência aos sulfatos.

Em suma, tendo em conta a totalidade dos parâmetros retratados nesta comparação, as argamassas que evidenciam melhor comportamento são o conjunto das argamassas de traço volumétrico 1:2.

Importa referir que a causa da desintegração precoce dos meios provetes das argamassas L3_Mk30 e L1_Mk50 deriva do tipo de fendilhação induzida pela ação dos sulfatos, sendo visível na figura 5.30. A argamassa L3_Mk30 (ao centro da figura) decompõe-se por destacamento superficial do provete e com perdas pequenas de material/ciclo. Este tipo de comportamento face à ação dos sulfatos foi notório igualmente para as argamassas sem Mk, como é exemplificado pela argamassa L3 (fig. 5.30 à esq.). A fendilhação de L1_Mk50 processou-se, primeiramente, por um ganho de massa inicial signicativo, derivado da maior facilidade de condução e deposição do NA_2SO_4 nas fendas internas dos meios provetes e estimulando posteriormente a reação com o aluminato tricálcico - C_3A - e o hidróxido de cálcio - $CaOH_2$ - presente nas argamassas, a partir das quais gera-se uma maior quantidade de produtos expansivos como a etringite (FARIA, 2004), os quais criam tensões internas que fragilizam e fissuram os provetes levando-os à rutura. De facto a fracturação dos meios provetes destas argamassas levou ao destacamento e perda de massa de amostras de dimensão superior às das restantes argamassas, sendo o efeito inicial da decomposição por ação dos sulfatos retratada na figura 5.30 (à dir.). Este tipo de comportamento foi verificado para as argamassas L1_Mk30 e L1_Mk50.

Figura 5.28 - Efeito da ação dos sulfatos sobre os meios provetes nas argamassas L3, L3_Mk30 e L1_MK50.

5. Discussão de resultados

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES GERAIS

O trabalho experimental apresentado nos capítulos anteriores incidiu sobre a influência de variações constitutivas de argamassas com base em cal aérea, tais como o incremento do traço em ligante na mistura e a substituição parcial da cal aérea por metacaulino na matriz de ligante, nas características laboratoriais dessas argamassas. Foi realizado no âmbito dos projetos FCT-MEC METACAL e LIMECONTECH. As conclusões apresentadas nesta secção são feitas tendo por base a influência destas variações sobre os parâmetros mecânicos, físicos, químicos e mineralógicos mais relevantes de uma argamassa.

A aceitação das argamassas para caracterização no estado endurecido foi feita com base na verificação dos valores de consistência por espalhamento no estado fresco conducentes a trabalhabilidades adequadas, que se fixaram no intervalo 140±10 mm.. Para as amassaduras em que este intervalo de valores não se verificou foram realizadas novas amassaduras com eventual acerto da água de amassadura até verificação desta parametrização. A média e o desvio padrão das nove argamassas finais estudadas situaram-se nos138±5mm.

Apesar de alguma disparidade entre os valores de espalhamento, a relação água / ligante (considerando como ligante o conjunto L+Mk) aumentou sempre com o aumento do teor em metacaulino da argamassa e, como espectável, diminuiu com o aumento do traço em ligante.

Quanto ao processo de cura, a disposição dos provetes na sala de cura húmida foi realizada a diferentes níveis com alturas diferentes; a medição da HR na sala de cura húmida foi feita apenas a um destes níveis, pelo que não foi possível aferir sobre a possível variação da % de HR com a altura de colocação dos provetes

O ensaio do Módulo de elasticidade dinâmico permitiu aferir sobre as características mecânicas, em termos de deformabilidade das argamassas. Os valores obtidos podem ser influenciados por fatores externos tais como o teor de humidade no interior dos provetes.

Os valores mínimos de deformabilidade traduzidos pelos mais elevados valores de Módulo de elasticidade verificaram-se para as argamassas com o traço mais forte em ligante. Os valores máximos verificaram-se aos 28 dias sugerindo que a reação pozolânica deu-se totalmente até esta idade. Porém a existência de portlandite livre disponível para carbonatação na argamassa L1, revela que argamassas com maior teor de cal aérea necessitam de um período de cura (carbonatação) mais prolongado do que o que ocorre para as argamassas com traço 1:2 e 1:3 sem metacaulino.

O incremento do Módulo de elasticidade dinâmico, conferido às argamassas pela substituição de 50% da massa de cal aérea por metacaulino, em comparação com as argamassas com

apenas 30% de substituição de massa, é mais significativo nas argamassas de traço 1:3 e 1:2 do que nas argamassas com traço mais forte em ligante.

As argamassas com adição de metacaulino apresentam uma tendência genérica de ganho de deformabilidade dos 28 para os 90, principalmente as argamassas de traço volumétrico 1:3, atestando que o Mk permite obter boas características mecânicas aos 28 dias das argamassas.

Os resultados obtidos, indicam que um traço mais forte em ligante tem mais influência sobre a deformabilidade de uma argamassa, do que uma substituição crescente de cal aérea por metacaulino.

Ao que ao ensaio de resistência à tração por flexão diz respeito, a adição de um teor crescente em metacaulino permitiu obter valores regulares e crescentes de R_T a cada idade de ensaio; o aumento de resistência é maior do que o verificado para as argamassas só de cal aérea na matriz de ligante.

O crescimento das resistências mecânicas com o aumento do teor em metacaulino é tanto maior quanto mais forte em ligante for o traço volumétrico. O aumento do teor em ligante tem maior influência sobre a R_T das argamassas com Mk do que sobre aquelas só de cal aérea.

Ocorreu um aumento progressivo da resistência à compressão, quer pelo aumento do traço volumétrico, quer do teor em metacaulino por substituição de massa de cal aérea. Essa tendência verificou-se tanto para o ensaio realizado aos 28 dias, como aos 90 dias.

O aumento de R_C é tanto mais exponencial quanto maior for a dosagem em ligante da argamassa. Apenas o conjunto das argamassas de traço volumétrico 1:2 aumentaram, todas, a R_C dos 28 para os 90 dias

Conclui-se que a argamassa L3_Mk50 é a única que apresenta valores dentro dos intervalos definidos por Veiga et al. (2010) para os 3 parâmetros mecânicos, pelo que indicia poder ser utilizada tanto para rebocos como para refechamento de juntas de edifícios antigos. As argamassas L3, L2 e L1 apresentam valores aceitáveis face às 3 características mecânicas mas apenas para utilização como rebocos.

No que respeita a absorção capilar, interessou obter argamassas com baixos valores para ambos os parâmetros. O aumento do teor em ligante fez aumentar o Coeficiente de Capilaridade e o Valor Assimptótico das argamassas, pelo que não constitui um incremento na melhoria das características da argamassa face à ação da água líquida.

No entanto, a adição de metacaulino embora tenha feito aumentar significativamente o Valor Assimptótico das argamassas, fez baixar o CC. Quanto a este ultimo parâmetro, a redução foi tanto maior quanto mais forte em ligante foi o traço. A substituição de 50% de massa de cal aérea por Mk revela conferir melhor comportamento no binómio destes dois parâmetros do que uma substituição de 30%.

O efeito do metacaulino sobre a melhoria do desempenho das argamassas face à água com a idade é igualmente ambíguo, tanto mais porque todas as argamassas com metacaulino aumentaram o

CC dos 28 para os 90 dias, enquanto todas as argamassas aumentaram o VA dos 28 para os 90 dias (inclusive as sem Mk).

Os valores mais baixos de VA demonstrados pelas argamassas sem Mk, quando associados à rápida velocidade de absorção, fazem destas argamassas aquelas que mais depressa atingem o patamar de saturação.

A impermeabilização das laterais dos provetes para a realização dos ensaios de análise do comportamento das argamassas face à ação da água aos 90 dias, levou a um aumento muito significativo do tempo total do ensaio de secagem (t_f), razão pela qual não foi possível comparar os valores do Índice de Secagem e da Taxa de Secagem dos 28 para os 90 dias. No entanto, embora no caso da capilaridade a influência da impermeabilização lateral possa não ter sido muito significativa devido ao ensaio decorrer em ambiente saturado e por isso a evaporação lateral ser muito reduzida, já o contrário acontece no ensaio de secagem, que decorre em ambiente de 65% de HR. O facto de existir ou não impermeabilização lateral e da base torna o fluxo de secagem unidirecional ou não. Face a uma aplicação em reboco ou no refechamento de juntas, considera-se que o fluxo unidirecional é mais representativo da realidade, razão pela qual se implementou a alteração do procedimento.

Aos 90 dias, a introdução parcial de metacaulino faz aumentar o Índice de Secagem das argamassas, indiciando uma maior dificuldade de secagem e revelando dessa forma desvantagem, neste aspeto, em relação às argamassas só com cal aérea.

Ao que à velocidade de secagem diz respeito, traduzida pela Taxa de Secagem, as argamassas de substituição apresentam os valores mais elevados para ambas as idades de ensaio, não permitindo assim aferir uma tendência clara do efeito do aumento do teor em ligante e/ou do teor crescente em Mk sobre este parâmetro de secagem.

Os métodos de determinação da Porosidade aberta não foram distintos entre idades mas aos 90 dias eliminaram-se perdas de material dos provetes que tinham ocorrido ligeiramente aos 28 dias por recurso a envolvimento das amostras em collants de nylon, pelo que não se procedeu à comparação de valores a idades de ensaio distintas.

Para ambas as idades, o aumento do teor em metacaulino levou ao aumento da Pab das argamassas com traço volumétrico mais fraco em ligante.

O aumento do teor em ligante fez aumentar a Pab das argamassas sem Mk aos 28 dias porém, essa tendência já não se revelou aos 90 dias.

É notório, para todos os traços e em ambas as idades de estudo, que as argamassas com 30 % de teor em metacaulino são aquelas que revelam ter um contributo mais significativo para o aumento deste parâmetro face às argamassas de cal aérea sem pozolana.

As argamassas com adição de metacaulino apresentam coeficientes de condutibilidade térmica inferiores às argamassas de cal aérea sem adição desta pozolana e do mesmo traço volumétrico, sendo igualmente bastante inferiores aos valores espectáveis como característicos das argamassas do cimento.

Entre as argamassas com adição de Mk, foi igualmente notória uma ligeira diminuição dos valores de condutibilidade nas argamassas com 30 % de substituição de massa de cal aérea por metacaulino comparativamente com as de 50% de substituição, sendo tal situação comum aos 3 traços volumétricos analisados.

Segundo uma análise por traço volumétrico, os melhores resultados obtidos (valores mais baixos) de condutibilidade térmica foram registados para as argamassas com adição de metacaulino (30% e 50%) e com a menor proporção de ligante face ao agregado (traço volumétrico 1:3).

Foi possível determinar que os valores mais elevados de condutibilidade térmica estão associados a valores mais baixos de Porosidade aberta quando a análise é feita segundo o traço volumétrico.

Concluiu-se que o comportamento das argamassas sem metacaulino face à ação dos sulfatos melhora com o envelhecimento.

As argamassas com Mk revelam um comportamento ambíguo face à ação do Na_2SO_4 a idades distintas: por um lado as argamassas que aos 28 dias melhor resistiram ao ataque dos sulfatos foram as argamassas com substituição parcial de metacaulino de traços volumétricos com maior teor em ligante, tais como L1_Mk50, L2_Mk30 e L2_Mk50; por outro lado, as argamassas com 30% de substituição de massa de ligante por Mk, revelam as maiores perdas de massa associadas à ação dos sulfatos aos 90 dias. Esta alteração do comportamento, revela que a permanência dos provetes em cura húmida pode ser prejudicial face ao comportamento posterior à ação deste agente químico e quando comparado com o que acontece com os provetes que permaneceram após os 28 dias em cura standard. Tal situação pode dever-se à cura húmida prolongada favorecer as resistências mecânicas mas favorecer também a constituição de compostos hidratados através da reação pozolânica, e estes compostos hidratados reagirem com os sulfatos produzindo compostos sulfatados expansivos, que conduzem a perdas elevadas de material dos provetes de argamassa.

Não foi possível estabelecer uma relação entre a Porosidade aberta, a variação de massa ao 7º ciclo do ensaio ao ataque de sulfatos e a evolução das resistências mecânicas (R_T e R_C). Porém, tendo em conta o conjunto dos parâmetros indicados, as argamassas que evidenciam melhor comportamento global são o conjunto das argamassas de traço volumétrico 1:2.

Numa análise global do trabalho realizado conclui-se que a adição de Mk à matriz do ligante traz alguns benefícios claros. A mais evidente foi a possibilidade de endurecimento rápido mesmo em condições de elevada humidade relativa em ambiente com fraco contacto com o CO_2. A vantagem foi também evidente no aumento das características mecânicas, principalmente aos 28 dias. A adição de metacaulino revela-se positiva igualmente no que concerne à redução da condutibilidade térmica e dos Coeficientes de Capilaridade (traços 1:2 e 1:1), sendo estes os principais parâmetros retratados na norma EN 998-1 (CEN, 2010). O benefício do seu emprego é ambíguo quanto ao aumento da resistência à ação dos sulfatos (bom aos 28 dias, menos positivo aos 90), situação que poderá ser reavaliada através da realização de um ensaio menos agressivo, e sobre os indicadores de secagem

(melhores valores de IS do que argamassa só com cal aérea com traço volumétrico 1:3 aos 28 dias, porém piores aos 90 dias).

No entanto, a adição de metacaulino pode revelar-se desvantajosa por aumentar o total de água absorvida por capilaridade face às argamassas sem Mk e conferir valores de características mecânicas muito elevados aos 90 dias face a aplicações em suportes de baixas resistências. Por seu lado, este aumento de características mecânicas das argamassas com Mk pode torná-las adequadas para aplicações e suportes de resistências mais elevadas, como sejam paredes mais recentes.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

No seguimento do trabalho realizado, indicam-se nesta secção algumas sugestões e/ou lacunas a nível analítico que se consideram importantes no sentido de melhorar as avaliações futuras da aplicabilidade deste tipo de argamassas.

Numa futura recriação das condições de ensaio preconizadas para esta dissertação, importa que na sala de cura húmida, seja feito um estudo do teor de humidade relativa de acordo com a altura a que se dispõem os provetes.

A realização de ensaios das características mecânicas aos 180 dias permitiria dissipar algumas dúvidas sobre a tendência de evolução destes parâmetros, para os quais o intervalo de tempo entre 28 e 90 dias não foi conclusivo, nomeadamente se os valores de E_{din} das argamassas sem metacaulino se aproximam das com Mk.

Ainda em relação às características mecânicas, o ensaio destas aos 60 dias constituiria uma oportunidade para verificar o estado de ocorrência das reações de carbonatação e pozolânica que os ensaios químicos e mineralógicos não permitiram aferir na totalidade. A presente análise indicia, a título de exemplo, a ocorrência de um decréscimo das resistências mecânicas após o cessar da reação pozolânica e um posterior aumento destas devido à carbonatação da cal aérea (argamassas de traço 1:2).

Os valores de porosidade aberta obtidos revelam um aparente aumento da porosidade com a introdução de metacaulino em argamassas de cal aérea. Considera-se assim necessário, efetuar um estudo mais aprofundado relativo à microestrutura interna das diferentes argamassas, através do ensaio de porosimetria de mercúrio. Este estudo permitiria validar que a absorção capilar (VA) aumenta em redes de poros de menor diâmetro, embora a velocidade de absorção (CC) diminua.

Considera-se importante a realização do ensaio de condutibilidade térmica sobre provetes com área de superfície de contacto igual ou superior à área da sonda de superfície e cruzá-los com os valores de Porosidade aberta desses mesmos provetes, no sentido de detalhar a correlação que parece existir entre estes dois parâmetros.

Recomenda-se a realização de ensaios de determinação da variação de massa por ação dos sulfatos sobre provetes ensaiados aos 28 e 90 dias submetidos a cura standard, uma vez que os resultados observados neste trabalho experimental beneficiam as argamassas expostas a cura standard entre os 28 e os 145 dias.

Apesar de terem sido preparadas frações de amostras para ensaio por microscopia eletrónica de varrimento, não foi possível a sua realização e análise de forma a ser interpretada no decorrer desta dissertação. Sugere-se, dessa forma, a sua realização e incorporação em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aggelakopoulou, E., Bakolas, A., Moropoulou, A. (2011). Properties of lime-metakolin mortars for the restoration of historic masonries. *Applied Clay Science, 53*(1), 15-19.

Baronio, G., Binda, L. (1997). Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. *Construction and Building Materials, 11*(1), 41-46.

Billong, N., Melo, U., Njopwouo, D., Louvet, F., Bonnet, J. (2009). Effect of mixture constituents on properties of slaked lime-metakaolin-sand mortars containing sodium hydroxide. *Cement & Concrete Composites, 31*(9), 658-662.

Borrelli, E. (1999). Porosity. ARC Laboratory Handbook, Volume 2/99. ICCROM, Roma.

Brito, V., Goncalves, T., Faria, P. (2011) Coatings applied on damp building substrates: performance and influence on moisture transport. *Journal of Coatings Technology and Research, 2011*, Vol.8 (4), 513(13).

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

CEN (1999/2006b). EN 1015-11:1999/A1:2006. Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strenght 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. (2009). EN 15801:2009. Conservation of cultural property. Test, methods. Determination of water absortion by capillarity. Brussels.

CEN. (2010). EN 998-1:2010: Specification for mortar for masonry. Part 1: Rendering and plastering mortar. Brussels

Cerny, R., Kunca, A., Tydlitat, V., Drchalova, J., Rovnanikova, P. (2006). Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters. *Construction and Building Materials, 20*(10), 849-857.

Chatterjee, A. (2000). "X-Ray Diffraction", Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology, pp. 275-332, William Andrew Publishing, LLC.

Cultrone, G., Sebastian, E., Huertas, M. (2005). Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes. *Cement and Concrete Research, 35*(12), 2278-2289.

El-Turki, A., Carter, M., Wilson, M., Ball, R., Allen, G. (2009). A microbalance study of the effects of hydraulicity and sand grain size on carbonation of lime and cement. *Construction and Building Materials, 23*(3), 1423-1428.

Faria, P. (2004). Argamassas de revestimentos para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes (Tese de Doutoramento em Engenharia Civil). FCT-UNL. Almada.

Faria, P. (2011). Caracterização de argamassas de cal e metacaulino. Procedimentos do projeto Metacal. DEC, FCT UNL.

Faria, P., Branco, T., Carneiro, J., Veiga, R., Santos Silva, A. (2012a). Argamassas com base em cal para reabilitação de rebocos. Em Patorreb 2012 - 4º Congresso de Patologia e Reabilitação de Edifícios (CD-ROM).

Faria, P., Henriques, F., Rato, V. (2007) – Argamassas correntes: influência do tipo de ligante e do agregado. 2º Congresso Nacional de argamassas de construção. Lisboa.

Faria, P., Henriques, F., Rato, V. (2008). Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation. *Journal of Cultural Heritage, 9*(3), 338-346.

Faria, P., Martins, A. (2011). Influence of curing conditions on lime and lime-metakaolin mortars. XII Internacional Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto - Portugal, 2011.

Faria, P., Silva, V., Carneiro, J., Branco, T., Mergulhão, D., Antunes, R. (2012b). Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural. In CIRea 2012 - Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria, 28-38.

Felgueiras, N. (2011). Avaliação da evolução das caracterísiticas de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino sujeitas a ambientes de diferentes humidades relativas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Almada.

Ferraz, E., Andrejkovičová, S., Santos Silva, A., Rocha, F.,Velosa, A. (2012) - Utilização do ensaio de Chapalle modificado para avaliação da reactividade pozolânica de metacaulinos. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS. Coimbra

Fortes-Revilla, C., Martinez-Ramirez, S., Blanco-Varela, M. (2006). Modelling of slaked lime-metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables. *Cement & Concrete Composites,* 28(5), 458-467.

Gameiro, A., Santos Silva, A., Veiga, R., Velosa, A., Faria, P. (2012)– Lime-metakaolin mortars for historical buildings repair: Study of the hardening reaction. ICDS12 – International Conference Durable Structures: from construction to rehabilitation. Lisbon, LNEC, 2012 (CD-rom, Com. 44)

Garboczi, J. (1995). Microstructure and transport properties of concrete. In Performance *Criteria for Concrete Durability.* RILEM Report 12. J. Kropp e H. K. Hilsdorf, editors. London: E. & F. N. Spon, ISBN 0-419-19880-6.

IPQ (2001). NP EN 12370:2001. Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à cristalização de sais. Lisboa.

IPQ (2006). NP EN 196-1:2006. Métodos de ensaio de cimentos - Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. 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 (2008). NP EN 1936:2008. Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. Monte de Caparica.

Kostuc, J. , Waltersand, V., Jones, T. (1993). High performance concretes incorporating metakaolin. In i. K. R. A review, M. Roderick (Eds.) (Ed.), *Inter Conference on Concrete 2000: Economic and Durable Construction Through Excellence, University of Dundee, II,*1779– 1811.

Lanas, J., Sirera, R., Alvarez, J. (2005). Compositional changes in lime-based mortars exposed to different environments. Thermochimica Acta, 429(2), 219-226.

Lanas, J., Sirera, R., Alvarez, J. (2006). Study of the mechanical behavior of masonry repair lime-based mortars cured and exposed under different conditions. *Cement and Concrete Research, 36*(5), 961-970.

Lawrence, R., Mays, T., Rigby, S., Walker, P., D'Ayala, D. (2007). Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars. *Cement and Concrete Research, 37*(7), 1059-1069.

Lawrence, R., Mays, T., Walker, P., D'Ayala, D. (2006). Determination of carbonation profiles in non-hydraulic lime mortars using thermogravimetric analysis. *Thermochimica Acta, 444*(2), 179-189.

Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., Kilikoglou, V. (2005). Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research, 35*(8), 1577-1586.

Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Moropoulou, A. (2003). Physico-chemical study of Cretan ancient mortars. *Cement and Concrete Rese*arch, 33(5), 651-661.

Margalha, G., Veiga, R., Brito, J. (2006). Algumas vantagens do uso da cal em pasta em revestimentos: Em Patorreb 2006. 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Porto.

Martins, A. (2010). A influência das condições de cura em argamassas de cais aéreas com e sem adição de metacaulino. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro - Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal.

Massena, R. (2011). Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino em exposição natural. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Almada.

Moropoulou, A.;Bakolas, A.; Bisbikou, K. (1995). Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques, *Thermochimica Acta*, 269/270, 779-795.

Moropoulou, A., Bakolas, A., Aggelakopoulou, E. (2001). The effects of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of the quicklime. *Cement and Concrete Research, 31*(4), 633-639.

Pacheco-Torgal, F., Moura, D., Ding, Y., Jalali, S. (2011). Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars. *Construction and Building Materials, 25*(9), 3732-3745.

Pera, J., Bonnin, E., Chabannet, M. (1998). Immobilization of wastes by metakaolin-blended cements *Special Publication* (Vol. 178, 997-1006).

Pina dos Santos, C; Matias, L. (2006) – Coeficientes de transmissão térmica de elementos opacos da envolvente dos edifícios. ITE 50. Lisboa, LNEC, (18ª edição).

Pinto, A. (2004). Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina do metacaulino. Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia - Universidade do Minho.

Rato, V. (2006). Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. FCT-UNL. Almada.

Rojas, M. (2006). Study of hydrated phases present in a MK–lime system cured at 60 °C and 60 months of reaction. Cement Concrete Research, 36 (5) 2006, 827 – 831.

Sepulcre-Aguilar, A., Hernandez-Olivares, F. (2010). Assessment of phase formation in lime-based mortars with added metakaolin, Portland cement and sepiolite, for grouting of historic masonry. *Cement and Concrete Research, 40*(1), 66-76.

Stefanidou, M. (2010). Methods for porosity measurement in lime-based mortars. *Construction and Building Materials, 24*(12), 2572-2578.

Stefanidou, M., Papayianni, I. (2005). The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars. *Cement & Concrete Composites, 27*(9-10), 914-919.

Tziotziou, M., Karakosta, E., Karatasios, I., Diamantopoulos, G., Sapalidis, A., Fardis, M. (2011). Application of ^{1}H NMR to hydration and porosity studies of lime-pozzolan mixtures. *Microporous and Mesoporous Materials, 139*(1-3), 16-24.

Vejmelkova, E., Keppert, M., Kerner, Z., Rovnanikova, P., Cerny, R. (2012). Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime-metakaolin plasters for renovation of historical buildings. *Construction and Building Materials, 31*, 22-28.

Veiga, R.; Carvalho, R. (1994) Argamassas de revestimento na reabilitação do património urbano. 2º ENCORE - Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. Vol. 1, pp. 195-206. Lisboa: LNEC.

Veiga, R., Fragata, A., Velosa, A., Magalhaes, A., Margalha, G. (2010). Lime-based mortars: Viability for use as substitution renders in historical buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 4(2), 177-195.

Velosa, A. (2006). Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas. Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Velosa, A. , Rocha, F., Veiga, R. (2009). Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristics. *Acta Geodynamica Et Geomaterialia, 6*(1), 121-126.

ANEXO I – DADOS CLIMÁTICOS DA SALA DE CURA HÚMIDA

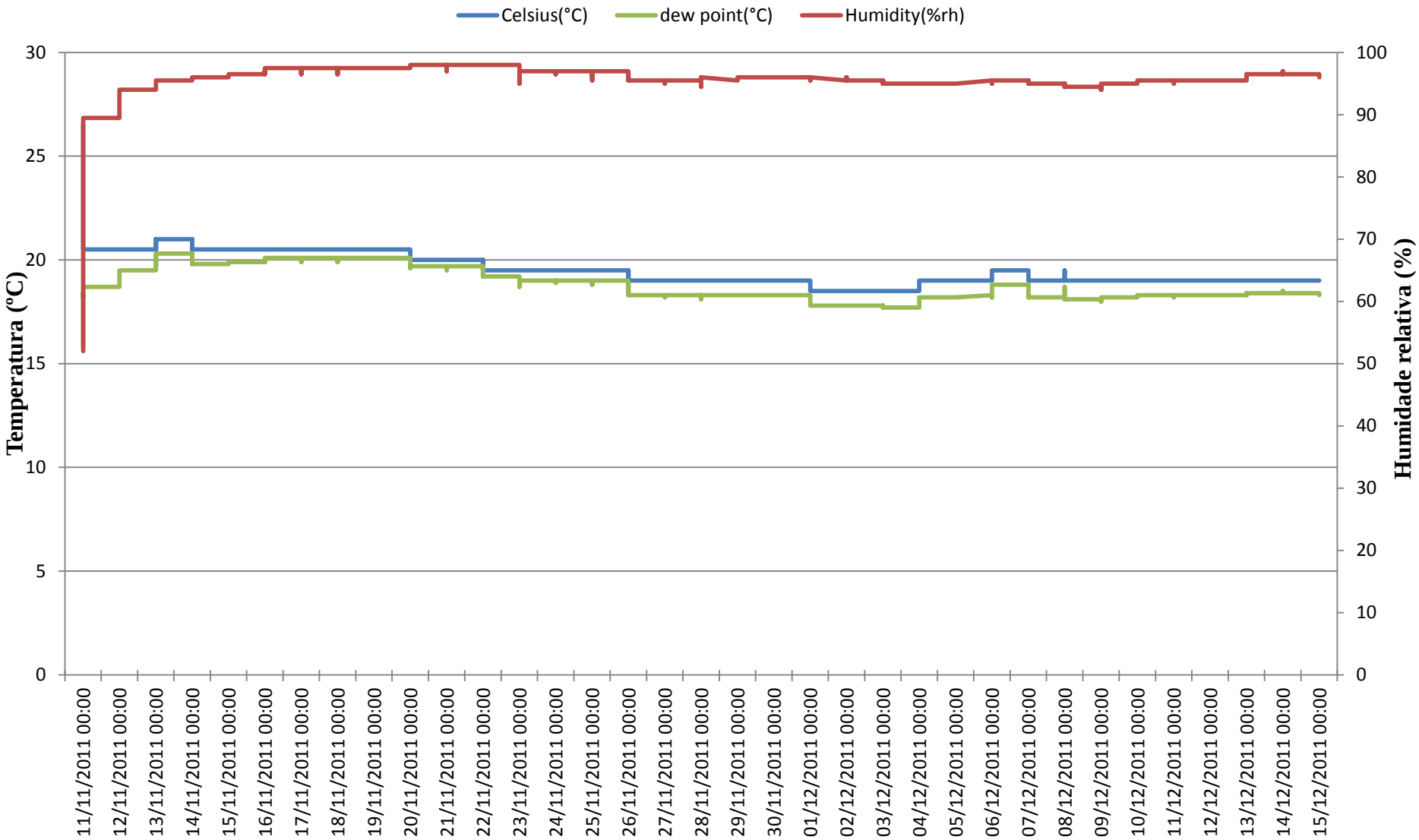

Figura I.I - Dados climáticos da sala de cura húmida.

ANEXO II – RESULTADOS DO ENSAIO DE CONSISTÊNCIA POR ESPLHAMENTO

Quadro II.I – Espalhamento das argamassas.

Argamassa		Massa seca (g)	Volume água (ml)	Espalhamento (mm)	Espalhamento médio (mm)	Dp (mm)
L3	T1	4867,3	1000	151	154	4
				157		
L3_Mk30	T2	4867,3	950	130	126	6
				122		
L3_Mk50	T3	4867,3	980	121	121	1
				120		
L2	T4	5060,4	1000	127	129	2
				130		
L2_Mk30	T5	4744,5	1000	143	143	1
				142		
L2_Mk50	T6	4744,5	1000	136	138	2
				139		
L1	T7	2926,7	600	123	125	1
				125		
		2008,0	411	125		
				125		
L1_Mk30	T8	4934,7	1100	128	133	4
				130		
				137		
				136		
L1_Mk50	T9	3109,7	750	139	138	2
				140		
		1825,0	440	138		
				135		
L3-2	T10	4867,3	950	147	143	5
				141		
				138		
				147		
L3_Mk30-2	T11	4867,3	970	137	139	5
				132		
				140		
				145		
L3_Mk50-2	T12	4867,3	1000	145	144	2
				142		
				144		
				146		
L1-2	T13	5487,6	1200	135	135	1
				134		
				134		
				135		
L1_Mk30-2	T14	4042,6	950	140	140	1
				141		
				140		
				138		

ANEXO III – RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS DE CADA PROVETE

Quadro III.I – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias.

Argamassa	*Provete*	*Massa*	E_{din} *[Mpa]*						*Média prov.*	*Dp*	*Média argamassa*	*Dp*
		[g]	E_1	E_2	E_3	E4	E5	E6	*[Mpa]*	*[Mpa]*	*[Mpa]*	*[Mpa]*
L3	T1-1	440,1	1916	1954	1923	1938			1933	16,9	1978	45
	T1-2	439,3	2034	2004	1973	1980			1998	27,6		
	T1-3	440,4	1990	1948	2028	2052			2005	45,5		
L3-2	T10-1	464,2	983	990	953	934	939	966	961	22,9	729	189
	T10-2	474,0	526	728	541	564	551	721	605	93,3		
	T10-3	476,7	583	715	581	639	485		601	84,6		
L3_Mk30	T2-1	448,1	1425	1431	1447	1443			1437	10,2	1457	65
	T2-2	442,9	1427	1389	1388	1383			1397	20,3		
	T2-3	441,0	1531	1510	1581	1530			1538	30,3		
L3_Mk30-2	T11-1	476,2	4292	4321	4257	4279			4287	26,7	4245	95
	T11-2	472,7	4121	4119	4147	4071			4115	31,7		
	T11-3	476,4	4329	4326	4326	4329	4264		4315	28,4		
L3_Mk50	T3-1	453,8	4479	4515	4501	4336	4498		4466	73,7	4576	118
	T3-2	452,2	4715	4737	4715	4715			4721	11,0		
	T3-3	452,3	4582	4570	4571	4548			4568	14,2		
L3_Mk50-2	T12-1	490,3	6713	3720	6654	6667			5939	1479,2	6690	1022
	T12-2	470,5	7499	7500	7543	7474			7504	28,6		
	T12-3	491,0	6659	6615	6618	6613			6626	21,9		
L2	T4-1	438,1	1928	1940	1900	1895			1916	21,7	1969	125
	T4-2	436,0	1851	1844	1846	1859			1850	6,7		
	T4-3	436,0	2021	2134	2054	2225	2094		2106	79,1		
L2_Mk30	T5-1	451,8	6087	6102	6127	6086			6101	19,1	6104	22
	T5-2	453,3	6107	6064	6104	6088			6091	19,7		
	T5-3	448,0	6096	6110	6137	6140			6121	21,3		
L2_Mk50	T6-1	459,8	9658	9625	9633	9563			9620	40,4	9383	265
	T6-2	456,6	8962	9364	9070	9336	9014	8962	9141	178,8		
	T6-3	457,6	9601	9642	9496	9540			9570	64,6		
L1	T7-1	434,5	1844	1989	1909	1929			1918	59,8	2115	147
	T7-2	435,9	2251	2284	2127	2114	2316		2218	92,4		
	T7-3	431,7	2225	2140	2119	2129	2238		2170	56,6		
L1-2	T13-1	449,2	1600	1558	1569	1582			1577	18,1	1728	138
	T13-2	443,3	1955	1817	1878	1822			1868	64,3		
	T13-3	436,2	1551	1763	1797	1805	1770		1737	105,6		
L1_Mk30	T8-1	473,9	10537	10525	10538	10524			10531	7,5	10830	345
	T8-2	483,2	10632	10827	10622	10624			10676	100,6		
	T8-3	463,4	11268	11229	11339	11292			11282	46,0		
L1_Mk30-2	T14-1	473,9	10331	10323	10232	10304			10298	45,1	10394	90
	T14-2	479,4	10331	10443	10384	10408			10392	47,0		
	T14-3	480,1	10465	10487	10519	10495			10492	22,3		
L1_Mk50	T9-1	465,7	11400	11476	11425	11443			11436	32,0	11747	308
	T9-2	474,0	12143	12135	12178	12109			12141	28,5		
	T9-3	471,6	11648	11695	11676	11639			11665	25,7		

Quadro III.II – Módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias.

Argamassa	*Provete*	*Massa*	E_{din} *[Mpa]*						*Média prov.*	*Dp*	*Média argamassa*	*Dp*
		[g]	E_1	E_2	E_3	E4	E5	E6	*[Mpa]*	*[Mpa]*	*[Mpa]*	*[Mpa]*
L3	T1-1	443,5	2733	2603	2635	2577			2605	68,3	2584	59
	T1-2	443,7	2532	2538	2528	2530			2532	4,3		
	T1-3	439,4	2581	2565	2621	2563			2583	26,9		
L3-2	T10-1	446,7	3283	3306	3315	3330			3317	19,7	3191	109
	T10-2	445,9	3184	3221	3146	3241			3203	41,9		
	T10-3	441,7	3124	3024	3096	3024			3048	51,0		
L3_Mk30	T2-1	441,2	875	893	862	868			874	13,4	863	80
	T2-2	438,6	1017	816	745	799			787	119,1		
	T2-3	438,0	812	984	818				901	97,6		
L3_Mk30-2	T11-1	451,4	1783	1589	1738	1771			1699	89,5	1629	100
	T11-2	449,3	1658	1663	1622	1639			1641	18,8		
	T11-3	455,0	1583	1525	1497	1485			1502	43,7		
L3_Mk50	T3-1	439,2	1517	1591	1722	1725			1679	102,4	1659	66
	T3-2	439,8	1711	1592	1652	1694			1646	53,0		
	T3-3	437,1	1682	1698	1664				1681	17,0		
L3_Mk50-2	T12-1	438,5	3399	3306	3272	3292			3290	56,3	3427	314
	T12-2	439,4	3795	3842	3853	3836			3844	25,3		
	T12-3	458,7	3271	3066	3115	3078			3086	94,7		
L2	T4-1	443,8	3705	2627	2647	2689			2654	526,0	3007	490
	T4-2	438,7	3742	2758	2734	2730			2741	500,8		
	T4-3	445,2	3653	2760	2653	3741	2649		2951	555,7		
L2_Mk30	T5-1	440,4	6252	7205	6950	6224			6793	495,9	6370	357
	T5-2	438,7	6200	6472	6267	6220			6320	124,7		
	T5-3	438,4	6298	6213	5908	6226			6116	172,9		
L2_Mk50	T6-1	443,3	7092	7192	7142	7123	7143	7141	7148	2079,1	8244	1597
	T6-2	442,9	7063	7020	7057	7070	9186	9251	7917	1170,2		
	T6-3	440,8	8370	6673	6734	6663	9291	9988	7870	1615,8		
L1	T7-1	439,9	3092	3059	3042	3023			3041	29,3	3060	184
	T7-2	442,0	3078	3255	3222	3442			3306	149,7		
	T7-3	445,1	2963	2914	2759	2868			2847	87,1		
L1-2	T13-1	433,3	2984	2941	2975	3217			3044	126,5	2884	150
	T13-2	431,3	2820	2846	2845	3031			2907	97,7		
	T13-3	434,3	2719	2741	2769	2722			2744	23,0		
L1_Mk30	T8-1	464,0	9497	9571	9437	9464			9491	58,0	9732	181
	T8-2	445,8	9840	9879	9857	9829			9855	21,8		
	T8-3	446,5	9856	9863	9830	9866			9853	16,4		
L1_Mk30-2	T14-1	436,6	7751	7812	7790	7752			7785	30,0	8089	242
	T14-2	444,1	8177	8194	8148	8149			8164	22,5		
	T14-3	447,6	8259	8312	8357	8364			8344	48,5		
L1_Mk50	T9-1	455,9	9905	9895	9851	9876			9874	23,8	10193	532
	T9-2	454,9	9956	9928	9929	9940	11183	10640	10324	550,1		
	T9-3	448,2	9649	9633	9687	9661	11204	10739	10185	619,4		

Quadro III.III – Resistências mecânicas aos 28 dias.

Argamassa	*Provete*	F_T	F_C	$R_{T\ provete}$	$R_{C\ provete}$	$R_{T\ arg}$	$R_{C\ arg}$	$Dp\ R_T$	$Dp\ R_C$
		[N]	*[N]*	**[MPa]**	**[MPa]**	**[MPa]**	**[MPa]**	**[MPa]**	**[MPa]**
L3	T1-1	73,2	395,0	0,171	0,247	0,180	0,232	0,007	0,025
	T1-2	78,1	326,1	0,183	0,204				
	T1-3	78,5	393,4	0,184	0,246				
L3-2	T10-1	-[7]	297,19	-	0,186	0,078	0,129	0,005	0,049
	T10-2	34,9	173,6	0,082	0,109				
	T10-3	31,6	149,9	0,074	0,094				
L3_Mk30	T2-1	63,0	1634,0	0,148	1,021	0,151	0,451	0,013	0,410
	T2-2	59,5	1479,2	0,139	0,925				
	T2-3	70,4	1645,8	0,165	1,029				
L3_Mk30-2	T11-1	263,8	1848,5	0,618	1,155	0,586	1,155	0,032	0,015
	T11-2	250,5	1825,2	0,587	1,141				
	T11-3	236,1	1872,7	0,553	1,170				
L3_Mk50	T3-1	192,9	4132,4	0,452	2,583	0,440	2,534	0,020	0,062
	T3-2	177,9	4088,8	0,417	2,556				
	T3-3	192,5	3943,2	0,451	2,465				
L3_Mk50-2	T12-1	478,1	4076,5	1,120	2,548	1,094	2,817	0,025	0,310
	T12-2	457,4	5049,8	1,072	3,156				
	T12-3	464,5	4394,8	1,089	2,747				
L2	T4-1	80,5	521,4	0,189	0,326	0,185	0,305	0,014	0,018
	T4-2	83,7	471,0	0,196	0,294				
	T4-3	72,4	470,8	0,170	0,294				
L2_Mk30	T5-1	315,3	4953,4	0,739	3,096	0,675	2,986	0,093	0,100
	T5-2	242,2	4641,2	0,568	2,901				
	T5-3	306,0	4739,5	0,717	2,962				
L2_Mk50	T6-1	479,4	9640,2	1,124	6,025	1,125	6,328	0,083	0,299
	T6-2	515,8	10137,0	1,209	6,336				
	T6-3	445,0	10595,8	1,043	6,622				
L1	T7-1	90,9	785,6	0,213	0,491	0,220	0,525	0,019	0,030
	T7-2	87,7	865,5	0,206	0,541				
	T7-3	102,8	870,5	0,241	0,544				
L1-2	T13-1	97,2	760,4	0,228	0,475	0,296	0,449	0,063	0,025
	T13-2	150,2	680,4	0,352	0,425				
	T13-3	131,9	713,2	0,309	0,446				
L1_Mk30	T8-1	1080,3	14684,0	2,532	9,177	1,977	8,961	0,530	0,631
	T8-2	820,8	13201,9	1,924	8,251				
	T8-3	629,3	15129,2	1,475	9,456				
L1_Mk30-2	T14-1	769,0	11975,7	1,802	7,485	2,066	6,879	0,236	0,926
	T14-2	962,3	11742,1	2,255	7,339				
	T14-3	913,5	9300,6	2,141	5,813				
L1_Mk50	T9-1	697,0	18680,8	1,634	11,675	1,783	13,468	0,349	1,698
	T9-2	931,3	24084,6	2,183	15,053				
	T9-3	654,3	21882,8	1,534	13,677				

[7] Provete partiu depois do ensaio de determinação do E_{din}

Quadro III.IV – Resistências mecânicas aos 90 dias.

Argamassa	*Provete*	F_T	F_C	$R_{T\ provete}$	$R_{C\ provete}$	$R_{T\ arg}$	$R_{C\ arg}$	$Dp\ R_T$	$Dp\ R_C$
		[N]	*[N]*	**[MPa]**	**[MPa]**	**[MPa]**	**[MPa]**	**[MPa]**	**[MPa]**
L3	T1-1	88,8	637,7	0,208	0,399	0,21	0,39	0,008	0,006
	T1-2	94,4	621,5	0,221	0,388				
	T1-3	87,8	618,7	0,206	0,387				
L3-2	T10-1	148,0	726,0	0,347	0,454	0,24	0,41	0,093	0,048
	T10-2	79,0	683,0	0,185	0,427				
	T10-3	79,0	576,0	0,185	0,360				
L3_Mk30	T2-1	38,4	800,8	0,090	0,500	0,08	0,48	0,005	0,060
	T2-2	34,2	854,0	0,080	0,534				
	T2-3	34,7	668,3	0,081	0,418				
L3_Mk30-2	T11-1	65,0	1228,0	0,152	0,768	0,16	0,81	0,024	0,055
	T11-2	57,0	1391,0	0,134	0,869				
	T11-3	77,0	1254,0	0,180	0,784				
L3_Mk50	T3-1	104,2	1605,7	0,244	1,004	0,28	0,99	0,028	0,110
	T3-2	120,4	1394,8	0,282	0,872				
	T3-3	127,6	1745,7	0,299	1,091				
L3_Mk50-2	T12-1	227,0	2820,0	0,532	1,763	0,58	1,89	0,075	0,588
	T12-2	284,0	4058,0	0,666	2,536				
	T12-3	230,0	2213,0	0,539	1,383				
L2	T4-1	158,4	933,8	0,371	0,584	0,36	0,62	0,025	0,035
	T4-2	141,2	1039,7	0,331	0,650				
	T4-3	161,2	1017,3	0,378	0,636				
L2_Mk30	T5-1	257,1	5345,0	0,602	3,341	0,65	3,61	0,043	0,269
	T5-2	279,8	6205,5	0,656	3,878				
	T5-3	293,4	5796,3	0,688	3,623				
L2_Mk50	T6-1	583,5	11819,1	1,367	7,387	1,43	7,03	0,061	0,630
	T6-2	610,9	10089,9	1,432	6,306				
	T6-3	635,9	11850,7	1,490	7,407				
L1	T7-1	233,1	1558,6	0,546	0,974	0,52	0,98	0,029	0,054
	T7-2	220,4	1476,9	0,516	0,923				
	T7-3	208,0	1650,2	0,488	1,031				
L1-2	T13-1	191,0	1072,0	0,448	0,670	0,44	0,68	0,037	0,393
	T13-2	168,0	1105,0	0,394	0,691				
	T13-3	198,0	1089,3	0,464	0,000				
L1_Mk30	T8-1	1037,7	18561,2	2,432	11,601	2,00	11,13	0,383	0,918
	T8-2	794,3	18742,7	1,862	11,714				
	T8-3	726,9	16113,3	1,704	10,071				
L1_Mk30-2	T14-1	481,0	12250,0	1,127	7,656	1,33	5,55	0,192	3,678
	T14-2	582,0	2082,0	1,364	1,301				
	T14-3	643,0	12298,0	1,507	7,686				
L1_Mk50	T9-1	1159,9	24226,9	2,718	15,142	2,62	15,28	0,087	0,250
	T9-2	1111,1	24913,4	2,604	15,571				
	T9-3	1087,5	24214,3	2,549	15,134				

ANEXO IV – RESULTADOS DOS ENSAIOS FÍSICOS DE CADA PROVETE

Quadro IV.I – Porosidade aberta aos 28 dias.

Argamassa	*Provete*	*Massa [g]*			*Poros. aberta provete*	*Poros. aberta argamassa*	*Dp argamassa*
		M_1	M_2	M_3	*[%]*	*[%]*	*[%]*
L3	T1-1	53,458	32,626	62,421	30,082	31	0,4
	T1-2	64,163	39,100	75,314	30,792		
	T1-3	52,748	32,258	61,803	30,648		
L3-2	T10-1	43,961	25,586	51,336	28,641	29	0,9
	T10-2	45,747	27,681	53,242	29,322		
	T10-3	49,864	30,683	58,255	30,433		
L3_Mk30	T2-1	57,691	35,235	68,286	32,057	32	0,6
	T2-2	57,012	34,837	67,960	33,053		
	T2-3	53,387	32,600	63,231	32,137		
L3_Mk30-2	T11-1	52,671	32,113	62,864	33,147	33	0,3
	T11-2	51,538	31,434	61,244	32,560		
	T11-3	52,183	31,883	62,110	32,841		
L3_Mk50	T3-1	57,801	34,474	68,404	31,250	31	0,3
	T3-2	61,298	36,540	72,617	31,375		
	T3-3	53,505	31,870	63,610	31,837		
L3_Mk50-2	T12-1	87,259	52,588	103,705	32,173	33	0,9
	T12-2	56,301	34,400	67,563	33,960		
	T12-3	52,962	32,409	63,263	33,386		
L2	T4-1	57,303	34,863	67,165	30,531	31	0,3
	T4-2	50,894	30,956	59,804	30,886		
	T4-3	43,326	26,482	50,611	30,192		
L2_Mk30	T5-1	54,882	33,391	65,638	33,355	33	0,0
	T5-2	63,315	38,325	75,817	33,346		
	T5-3	56,205	33,996	67,356	33,426		
L2_Mk50	T6-1	49,160	29,435	58,543	32,235	32	0,8
	T6-2	58,597	35,149	69,956	32,634		
	T6-3	55,440	33,059	65,563	31,144		
L1	T7-1	54,439	33,054	64,217	31,377	31	0,6
	T7-2	53,288	32,402	62,660	30,974		
	T7-3	49,715	29,978	58,221	30,117		
L1-2	T13-1	52,886	31,861	62,709	31,843	32	0,1
	T13-2	55,206	33,406	65,355	31,766		
	T13-3	52,472	31,629	62,281	32,001		
L1_Mk30	T8-1	62,410	37,358	74,548	32,638	33	0,4
	T8-2	69,818	42,119	83,752	33,469		
	T8-3	63,200	37,847	75,612	32,866		
L1_Mk30-2	T14-1	66,719	40,531	81,101	35,450	36	0,2
	T14-2	47,538	28,897	57,962	35,864		
	T14-3	52,425	31,912	63,674	35,417		
L1_Mk50	T9-1	52,908	31,698	63,632	33,582	33	0,3
	T9-2	64,032	38,272	77,120	33,690		
	T9-3	60,428	36,199	72,428	33,123		

Quadro IV.II – Porosidade aberta aos 90 dias.

Argamassa	*Provete*	*Massa [g]*			*Poros. aberta provete*	*Poros. aberta argamassa*	*Dp argamassa*
		M_1	M_2	M_3	*[%]*	*[%]*	*[%]*
L3	T1-1	44,546	26,116	52,690	30,6	25,0	4,9
	T1-2	68,516	38,347	77,051	22,1		
	T1-3	52,319	29,386	58,887	22,3		
L3-2	T10-1	59,54	33,092	70,855	30,0	31,1	2,3
	T10-2	44,918	24,727	55,203	33,7		
	T10-3	50,781	27,617	60,491	29,5		
L3_Mk30	T2-1	43,436	25,417	50,873	29,2	29,5	0,4
	T2-2	49,423	29,079	58,086	29,9		
	T2-3	20,674	12,179	24,195	29,3		
L3_Mk30-2	T11-1	59,148	34,895	72,384	35,3	35,7	0,5
	T11-2	57,435	34,012	70,322	35,5		
	T11-3	22,686	13,247	28,054	36,3		
L3_Mk50	T3-1	59,428	35,257	70,318	31,1	30,7	0,4
	T3-2	70,526	41,708	83,244	30,6		
	T3-3	48,937	28,711	57,740	30,3		
L3_Mk50-2	T12-1	65,141	37,902	79,449	34,4	36,1	2,0
	T12-2	51,391	29,37	63,541	35,6		
	T12-3	31,853	18,26	40,311	38,4		
L2	T4-1	51,620	29,412	58,435	23,5	23,3	0,4
	T4-2	61,826	35,064	69,728	22,8		
	T4-3	62,394	35,610	70,624	23,5		
L2_Mk30	T5-1	51,826	34,114	60,025	31,6	31,2	0,4
	T5-2	67,957	40,220	80,332	30,9		
	T5-3	67,965	40,284	80,510	31,2		
L2_Mk50	T6-1	66,130	38,751	77,910	30,1	30,3	0,4
	T6-2	101,739	59,817	119,834	30,1		
	T6-3	81,919	48,175	96,903	30,8		
L1	T7-1	39,561	23,220	45,842	27,8	27,3	0,4
	T7-2	54,625	32,300	62,942	27,1		
	T7-3	56,001	33,073	64,447	26,9		
L1-2	T13-1	71,947	41,848	88,058	34,9	33,6	1,5
	T13-2	55,12	32,157	65,903	32,0		
	T13-3	46,716	27,275	56,681	33,9		
L1_Mk30	T8-1	88,786	52,882	104,888	31,0	31,1	0,1
	T8-2	59,769	35,521	70,672	31,0		
	T8-3	59,287	35,029	70,289	31,2		
L1_Mk30-2	T14-1	52,575	30,371	63,33	32,6	33,5	0,8
	T14-2	59,433	34,993	71,766	33,5		
	T14-3	58,149	33,94	70,792	34,3		
L1_Mk50	T9-1	61,633	36,017	74,173	32,9	33,0	0,1
	T9-2	58,913	34,883	70,823	33,1		
	T9-3	63,293	37,355	76,124	33,1		

Quadro IV.III – Condutibilidade térmica.

Argamassa	Provete	λ [W/mK]			λ Médio Provete	D.P. Provete	λ Médio Argamassa	D.P. Argamassa
		1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura				
L3	T1-1	0,687	0,664	0,703	0,685	0,020	0,676	0,021
	T1-2	0,681	0,642	0,681	0,668	0,023		
L3-2	T10-1	0,764	0,698	0,685	0,716	0,042	0,691	0,040
	T10-2	0,679	0,646	0,674	0,666	0,018		
L3_Mk30-2	T11-1	0,557	0,549	0,553	0,553	0,004	0,552	0,026
	T11-2	0,506	0,558	0,587	0,550	0,041		
L3_Mk50-2	T12-1	0,573	0,586	0,607	0,589	0,017	0,585	0,015
	T12-2	0,588	0,593	0,565	0,582	0,015		
L2	J4-1	0,699	0,696	0,678	0,691	0,011	0,688	0,010
	J4-2	0,689	0,692	0,675	0,685	0,009		
L2_Mk30	J5-1	0,617	0,651	0,595	0,621	0,028	0,630	0,021
	J5-2	0,641	0,642	0,632	0,638	0,006		
L2_Mk50	J6-1	0,650	0,657	0,667	0,658	0,009	0,648	0,013
	J6-2	0,637	0,638	0,636	0,637	0,001		
L1-2	T13-1	0,844	0,779	0,735	0,786	0,055	0,788	0,044
	T13-2	0,826	0,799	0,743	0,789	0,042		
L1_Mk30-2	J14-2	0,650	0,627	0,596	0,624	0,027	0,621	0,021
	J14-3	0,622	0,633	0,597	0,617	0,018		
L1_Mk50	T9-1	0,62	0,624	0,593	0,612	0,017	0,634	0,033
	T9-2	0,687	0,656	0,625	0,656	0,031		

ANEXO V – ENSAIOS QUÍMICOS E MINERALÓGICOS

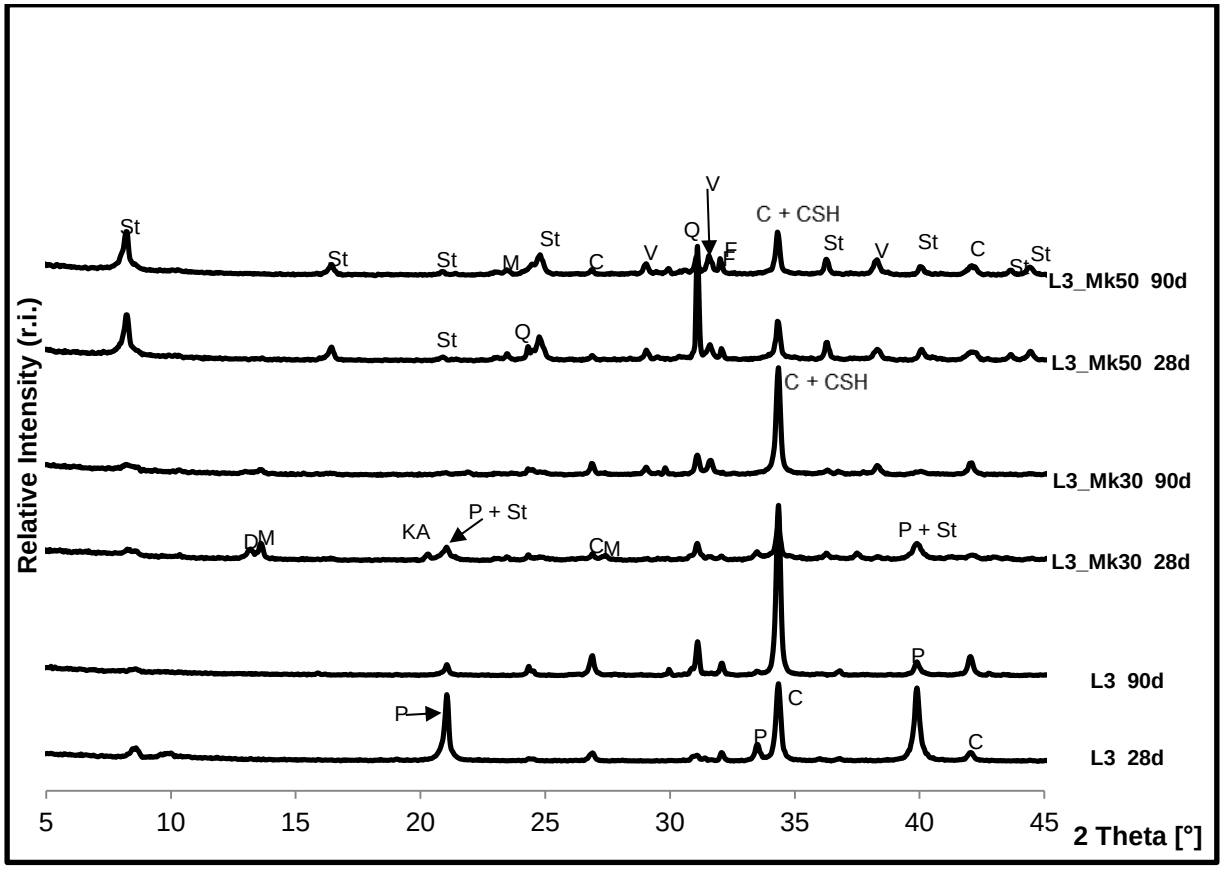

Figura V.I - DRX das argamassas de traço volumétrico 1:1 aos 28 e 90 dias.

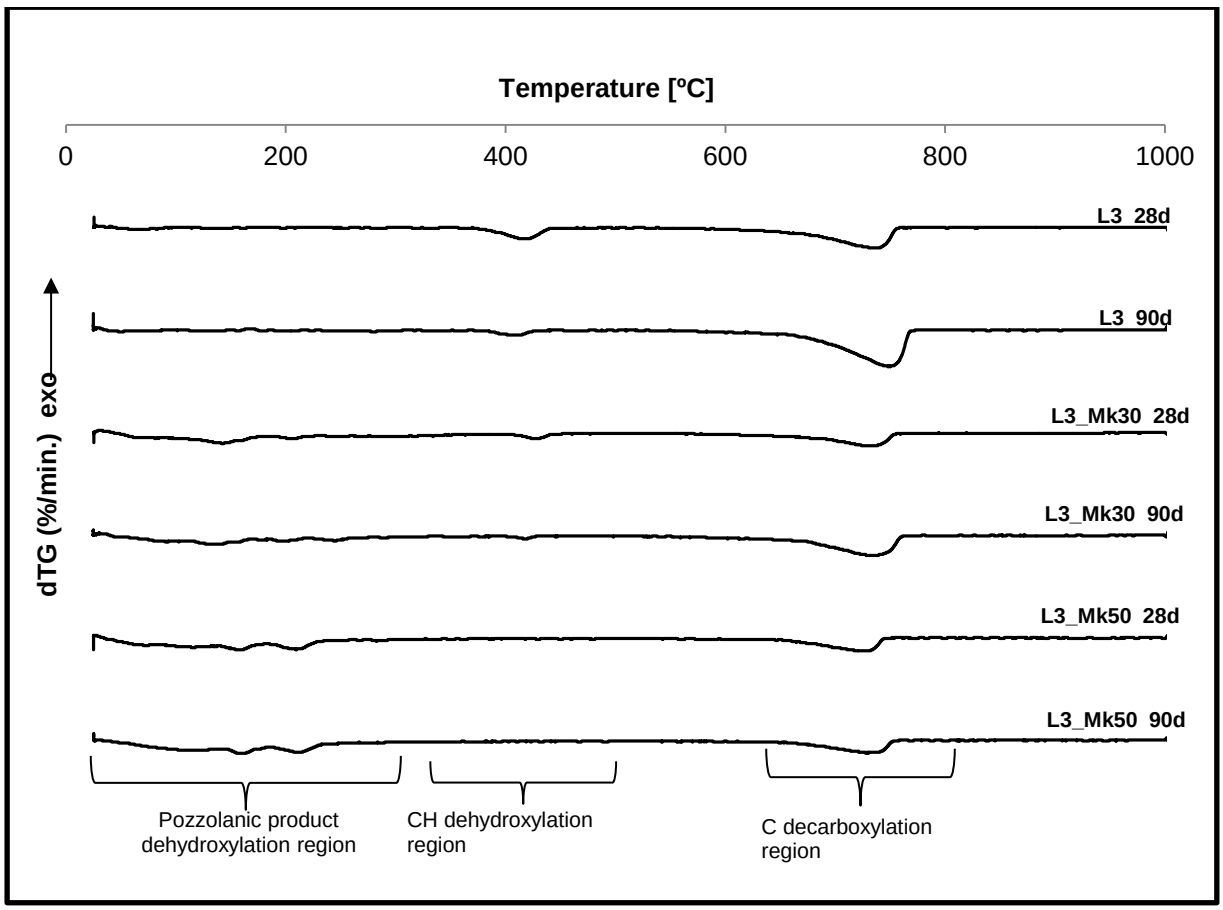

Figura V.II - dTG das argamassas de traço volumétrico 1:3 aos 28 e 90 dias.

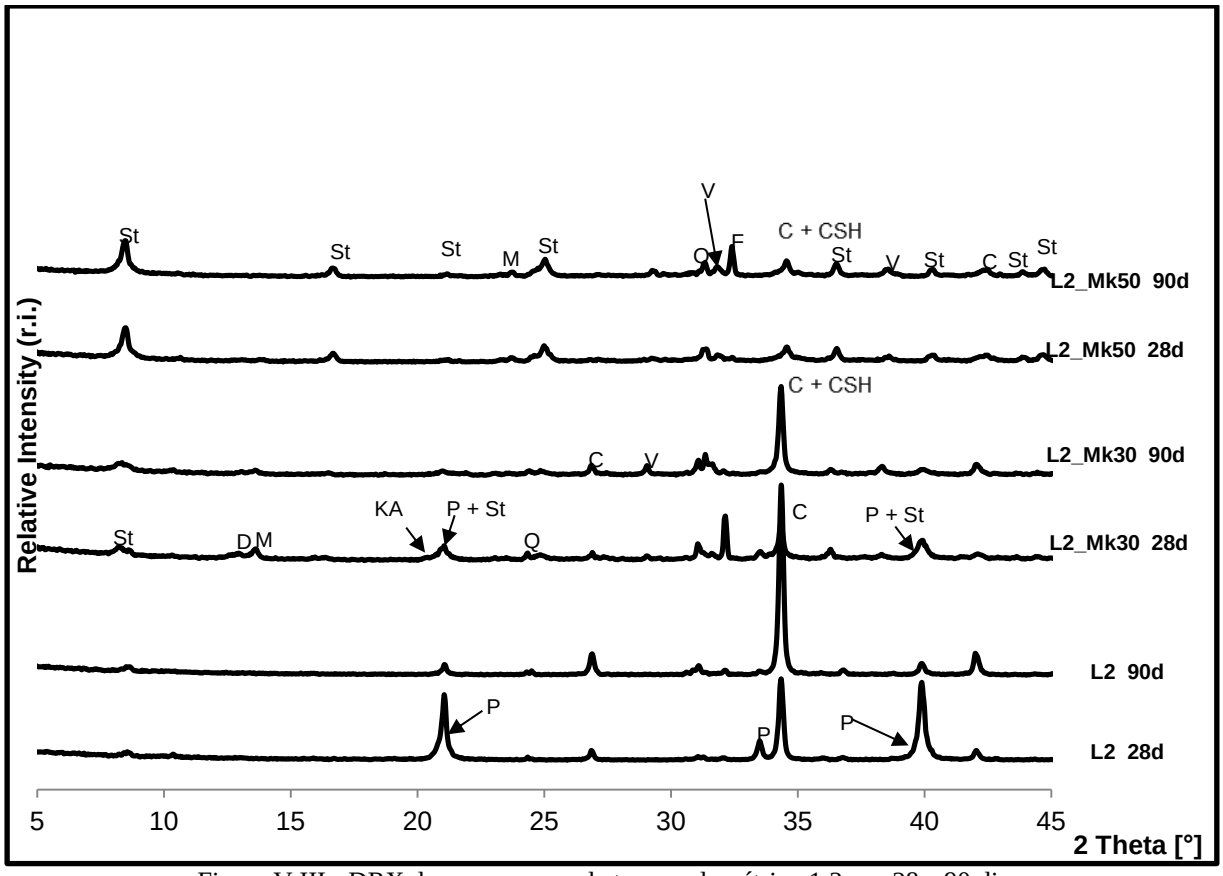

Figura V.III - DRX das argamassas de traço volumétrico 1:2 aos 28 e 90 dias.

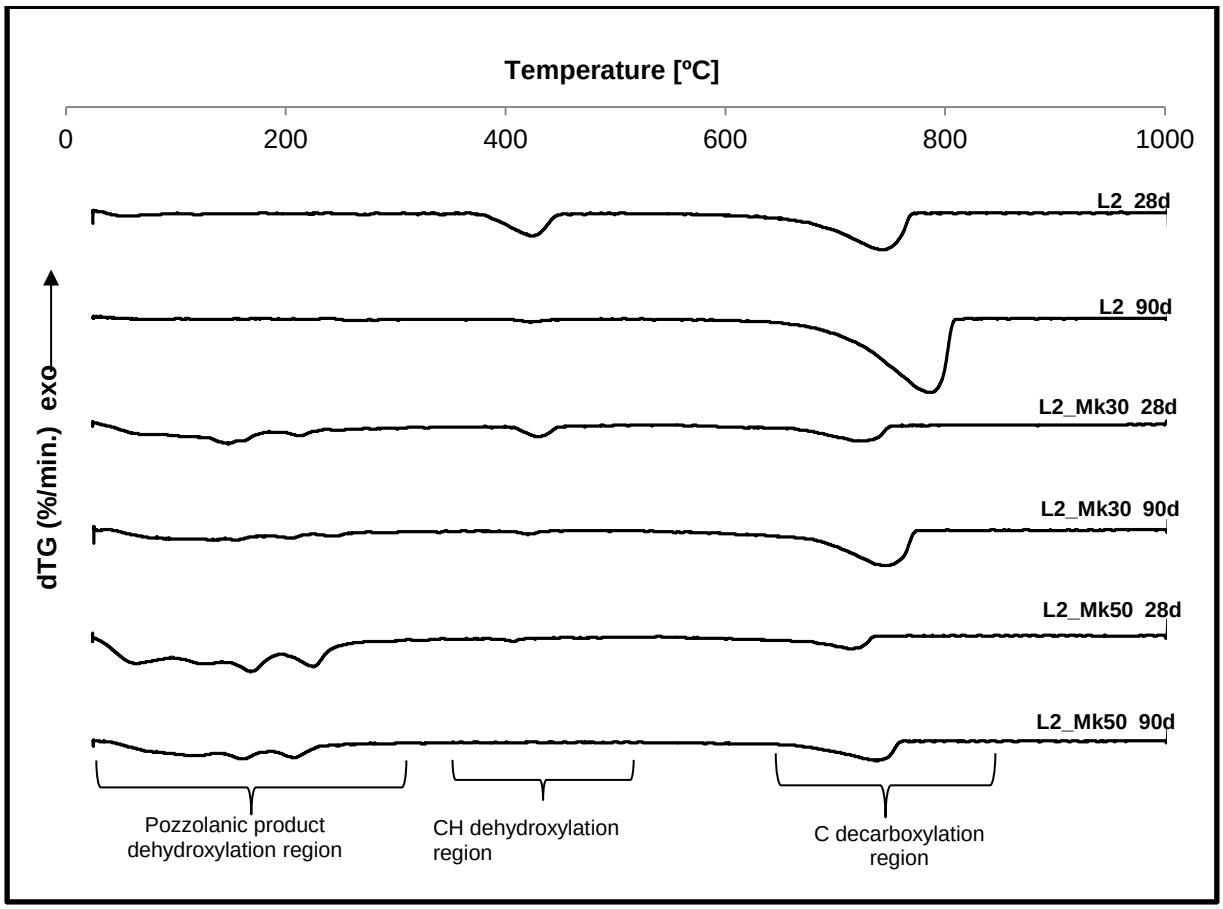

Figura V.IV - dTG das argamassas de traço volumétrico 1:2 aos 28 e 90 dias.

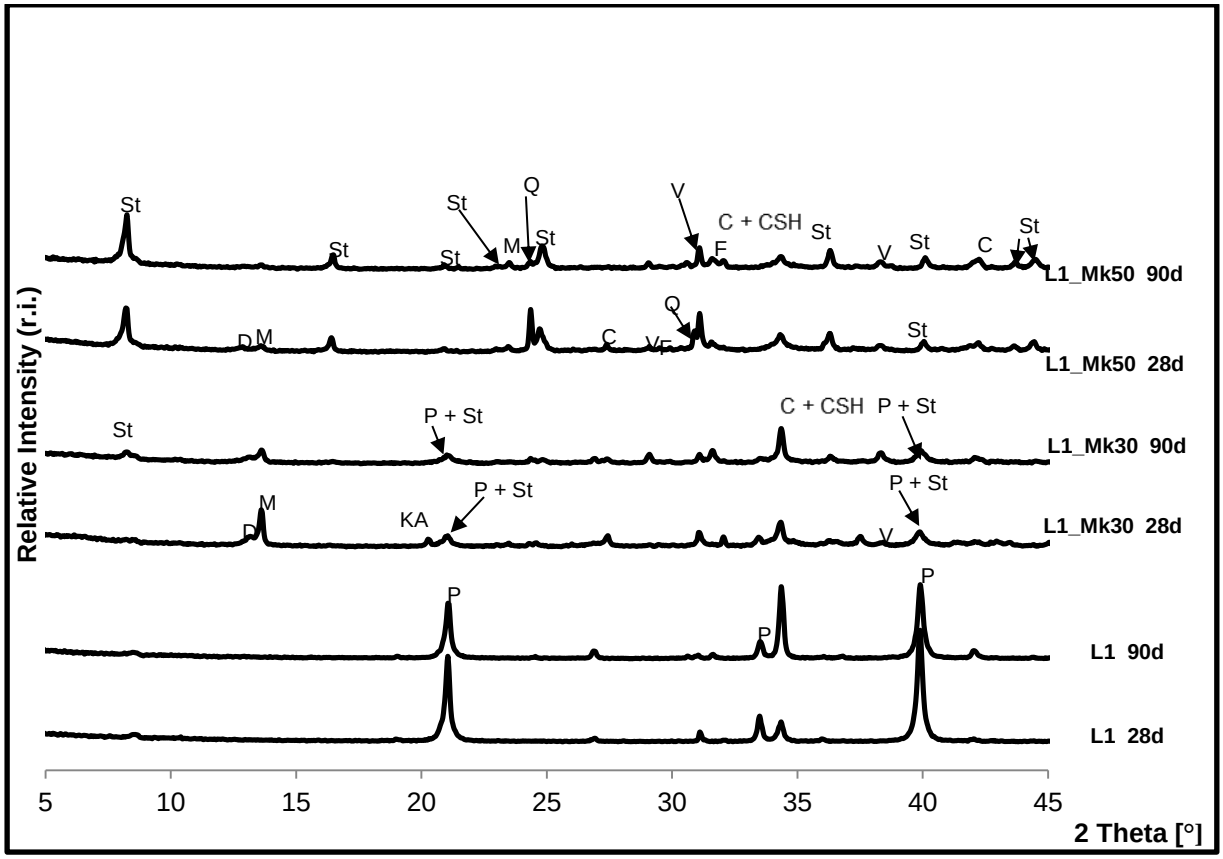

Figura V.V - DRX das argamassas de traço volumétrico 1:1 aos 28 e 90 dias.

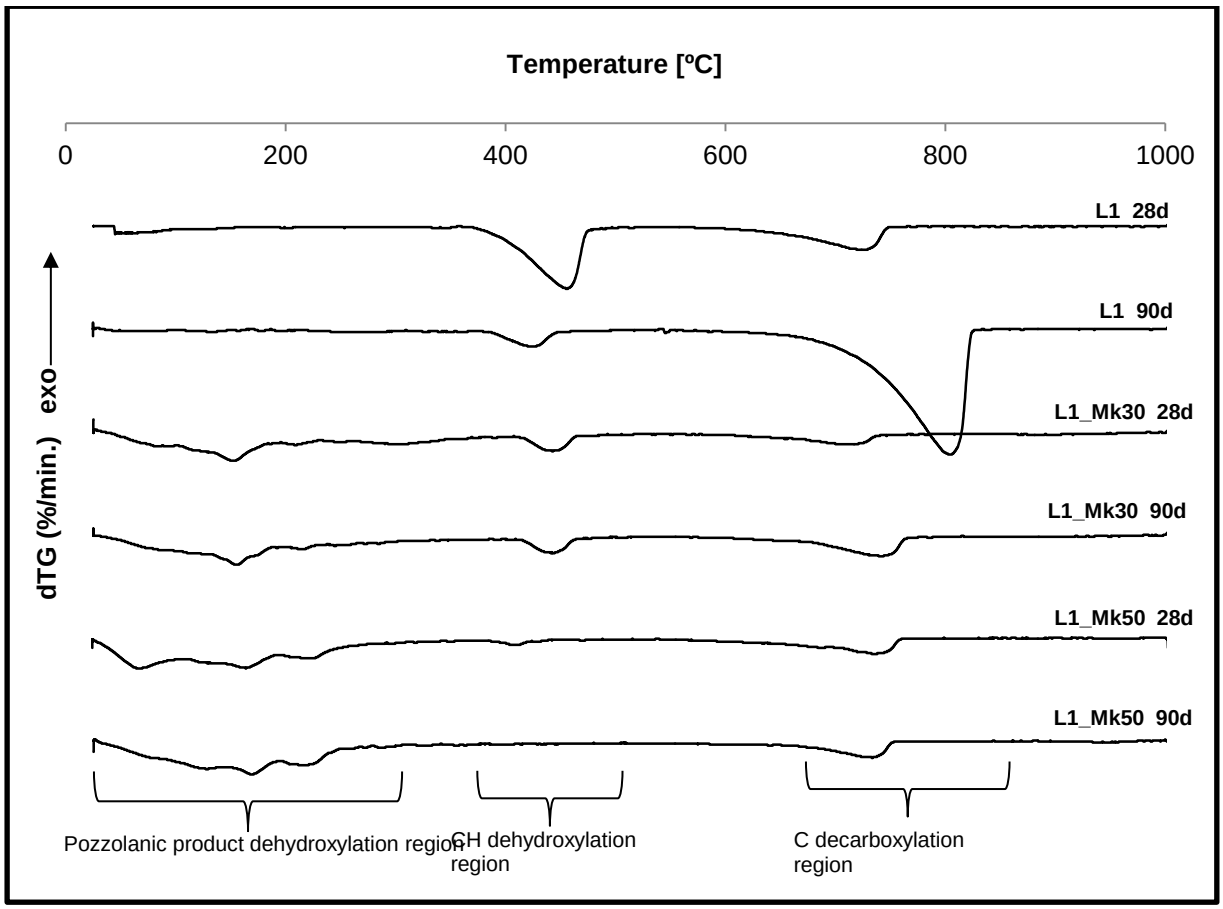

Figura V.VI - dTG das argamassas de traço volumétrico 1:1 aos 28 e 90 dias.