



Teresa Isabel Marques Fontes

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

Argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional

Otimização de características com resíduo cerâmico e metacaulino

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

Orientadora: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Associada,
Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

Co-Orientador: António Santos Silva, Investigador Auxiliar, Departamento de
Materiais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Professor Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão

Arguente: Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres

Vogal: Professora Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues

Vogal: Doutor António Santos Silva



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho de 2013



Teresa Isabel Marques Fontes

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

Argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional

Otimização de características com resíduo cerâmico e metacaulino

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

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

Co-Orientador: António Santos Silva, Investigador Auxiliar, Departamento de
Materiais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Professor Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão

Arguente: Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres

Vogal: Professora Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues

Vogal: Doutor António Santos Silva



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho de 2013

‘Copyright’ Teresa Isabel Marques Fontes, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficas, 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

A concretização deste trabalho representa a conclusão de uma longa caminhada, ao longo da qual contei com o apoio e colaboração de diversas pessoas a quem expresso o meu agradecimento.

Em primeiro lugar, à minha orientadora científica Professora Doutora Paulina Faria, pela orientação, disponibilidade, incentivo, pelo conhecimento que me transmitiu, pelo seu interesse e pela oportunidade de desenvolver este trabalho e de escrever o artigo científico apresentado no congresso “Construção’12” em Coimbra. Agradeço particularmente pelo entusiasmo contagiante e simpatia.

Ao meu co-orientador Doutor António Santos Silva, pelo apoio na realização e sobretudo na análise de resultados dos ensaios realizados no Departamento de Materiais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Um grande obrigado pela simpatia, pelos conhecimentos que me transmitiu e por ter “aturado” as minhas infinitas questões.

Ao Eng.^o Vítor Silva, pela sua ajuda e colaboração incansável ao longo toda a campanha experimental, pelo seu interesse no meu trabalho, pelas opiniões, sugestões e conhecimento partilhado. Um muito obrigado por todas as conversas, por me ajudar a abrir horizontes, por colaborar também para o meu desenvolvimento enquanto pessoa. Agradeço por toda a simpatia e amizade demonstradas ao longo dos últimos meses.

Ao João Grilo por toda a ajuda durante a execução deste trabalho e principalmente na sua conclusão. Ao André Gameiro e ao colega Daniel Cardoso, a Luzia Barracha e a Paula Menezes por todo o apoio prestado na realização de ensaios no Departamento de Materiais do LNEC.

À Eng.^a Gina Matias, do ITeCons, por ter realizado os ensaios de granulometria a laser à amostra de resíduo cerâmico.

À Secil e à Imerys pela disponibilização da cal NHL3.5 e do metacaulino, respetivamente.

Aos projetos METACAL (PTDC/ECM/100431/2008) e “Incorporação de resíduos de cerâmica em argamassas de reabilitação” (EXPL/ECM-COM/0928/2012) financiados pela Fundação para a Ciência e Tecnologia e no âmbito dos quais se inseriu o presente trabalho.

Aos colegas que acompanharam esta fase um muito obrigado pela colaboração e também pelos momentos de convívio: Cátia Abreu, Inês Dias, Naila Jamú.

Aos amigos que fiz que ao longo do percurso académico e com quem vivi tantos momentos fantásticos: Ana Rita, Ana Filipa, Andreia, Carla, Cláudia, Helena, Margarida, Mafalda, Sandra, Susana, Marta, Nuno e Cristiana.

Aos amigos que apesar de muitas vezes distantes, sempre me apoiaram: Marta, Patrícia, Sara Fernandes, Sara Rodrigues, Daniel, Ana Nunes e João Machado.

Ao Fernão, que surgiu no fim desta caminhada, mas que me apoiou e encorajou, com muita paciência, nos momentos mais complicados da conclusão deste trabalho.

Agradeço ainda à minha madrinha Catarina, pelo seu apoio e pela sabedoria que sempre me transmitiu. E também por ter ouvido tantos dos meus monólogos cheios de entusiasmado.

Finalmente à minha família, especialmente aos meus pais que possibilitaram o desenvolvi-

mento do meu percurso acadêmico e me incentivaram e apoiaram em toda a caminhada. Agradeço-lhes ainda pela educação e pelos valores que sempre me transmitiram e que ajudaram a definir a minha personalidade.

RESUMO

Em Portugal, durante as últimas duas décadas, constatou-se um excesso de construção nova. Atualmente, dada a crise no sector e o número exagerado de frações desocupadas, o foco deixou de ser a construção nova para passar a ser reabilitação e conservação do edificado existente. Por outro lado, os muitos edifícios considerados como património histórico e cultural exigem conservação e, por vezes, reabilitação. Outra das problemáticas bastante discutidas atualmente é a sustentabilidade da construção visto que o mercado da construção civil gera consideráveis impactos ambientais.

Por outro lado é frequente a fachada de um edifício evidenciar degradação, uma vez que os revestimentos exteriores têm uma maior exposição às condições ambientais. Quando é inviável a conservação do reboco exterior, opta-se pela sua substituição ou reparação. Em qualquer dos casos é fundamental uma escolha adequada dos materiais a adotar para a constituição das argamassas. Estas deverão ter características semelhantes às do suporte e, particularmente nos casos de edifícios antigos, às argamassas originalmente aplicadas.

No presente trabalho são caracterizadas argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 com substituições de massa de cal por resíduo cerâmico e metacaulino. Para tal foram realizadas seis composições diferentes: uma argamassa de referência e cinco onde variam os teores de resíduo e de metacaulino. As argamassas foram realizadas ao traço volumétrico 1:3 e cada composição foi sujeita a três condições de cura distintas: cura húmida, cura com aspersão inicial (SP) e cura segundo a norma EN 1015-11:1999. Foram realizados ensaios de carácter mecânico, físico, químico e microestrutural, sendo ainda avaliada a evolução do comportamento das diversas argamassas ao longo da idade, dos 28 para os 90 dias.

Constata-se que as argamassas com resíduo cerâmico em substituição de massa de cal e quando sujeitas a curas SP, mais facilmente reproduzível em obra, apresentam resultados bastante adequados para uso em edifícios antigos.

Termos chave: Argamassa; cal hidráulica natural; resíduo cerâmico; metacaulino; influência da cura; influência da idade.

ABSTRACT

In Portugal, during the last two decades, there was an excess of new construction. Currently, due to the crisis in the sector and the exaggerated number of fractions uninhabited, the focus is no longer the new construction to pass to be rehabilitation and conservation of buildings. On the other hand, many buildings considered historic and belonging to cultural heritage require conservation. Another issue currently discussed is sustainable construction since the construction market generates considerable environmental impacts.

Furthermore the facade of a building generally shows degradation, because renderings have higher exposure to environmental conditions. When the conservation of the renderings is unviable, the choice should be its reparation or replacement. In this case, it is fundamental an adequate choice of materials to adopt for the composition of mortars. Considering the masonry of an ancient building, the mortar must have similar characteristics to masonries and mortars originally applied.

In the present work, natural hydraulic lime-based mortars with substitutions of mass of lime for ceramic waste and metakaolin are characterized. For such, six different compositions were formulated: a reference mortar and five mortars with different levels of ceramic waste and metakaolin. The mortars were made with 1:3 volumetric proportion and each composition was subjected to three different curing conditions: wet curing, curing with initial spraying and curing according to EN 1015-11:1999. Mortars were mechanically, physically, chemically and microstructurally characterised. The influence of age on the behaviour of mortars was also analysed.

It is observed that mortars with ceramic waste and subjected to initial spraying, more easily to reproduce on site, show appropriate results for use as old masonry rendering.

Keywords: Mortar; natural hydraulic lime; ceramic waste; metakaolin; influence of curing; influence of age.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Materiais

NHL – Cal hidráulica natural NHL3.5 produzida pela Secil

Mk – Metacaulino 1200S da Imerys

T – Resíduo cerâmico resultante da trituração de ladrilhos de revestimento

APAS 12 – Areia de granulometria grossa

APAS 20 – Areia de granulometria intermédia

APAS 30 – Areia de granulometria fina

Condições de cura

St – Cura standard

SP – Cura com aspersão inicial de água

H – Cura húmida

Argamassas

NHL – Argamassa de referência

NHL_5T – Argamassa com 5% de massa de cal substituída por massa equivalente de resíduo cerâmico

NHL_10T – Argamassa com 10% de massa de cal substituída por massa equivalente de resíduo cerâmico

NHL_5T+5Mk – Argamassa com 5% de massa de cal substituída por massa equivalente de resíduo cerâmico e 5% por metacaulino

NHL_5T+10Mk – Argamassa com 5% de massa de cal substituída por massa equivalente de resíduo cerâmico e 10% por metacaulino

NHL_10T+10Mk – Argamassa com 10% de massa de cal substituída por massa equivalente de resíduo cerâmico e 10% por metacaulino

Ensaios realizados e parâmetros analisados

HR – Humidade relativa

Ed – Módulo de elasticidade dinâmico

Rt – Resistência à tração por flexão

Rc – Resistência à compressão

Pab – Porosidade aberta

CC – Coeficiente de capilaridade

VA – Valor assintótico

TS – Taxa de secagem

IS – Índice de secagem

λ – Condutibilidade térmica

V.M. – Variação de massa

ATG – Análise termogravimétrica

DRX – Difração por raios x

MIP – Porosimetria por intrusão de mercúrio

ÍNDICE

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento e motivações.....	1
1.2.	Objetivos e metodologia.....	3
1.3.	Estrutura e organização do texto.....	3
2.	Estado do conhecimento.....	5
2.1.	Constituintes das argamassas	5
2.1.1.	Ligantes – Cal hidráulica natural	5
2.1.2.	Agregados - areias	7
2.1.3.	Pozolanas	8
2.2.	Argamassas de substituição.....	10
2.2.1.	Considerações iniciais	10
2.2.2.	Alvenarias e rebocos antigos	11
2.2.3.	Materiais utilizados em argamassas de substituição	11
2.2.4.	Escolha adequada das argamassas de substituição	12
2.3.	Argamassas baseadas em cal com pozolanas	15
3.	Desenvolvimento da campanha experimental.....	17
3.1.	Descrição geral.....	17
3.2.	Constituintes das argamassas	17
3.2.1.	Areias.....	17
3.2.2.	Cal hidráulica natural	18
3.2.3.	Metacaulino	18
3.2.4.	Resíduo cerâmico.....	18
3.2.5.	Água.....	19
3.3.	Preparação de argamassas e de provetes	19
3.3.1.	Amassadura	20
3.3.2.	Provetes prismáticos	20
3.3.3.	Aplicação em tijolos.....	21
3.4.	Condições de cura	21
3.4.1.	Cura Húmida	22
3.4.2.	Cura com aspersão inicial de água	22
3.4.3.	Cura standard.....	23
4.	Ensaio e resultados de caracterização	25
4.1.	Descrição geral.....	25
4.2.	Ensaio aos constituintes secos.....	25
4.2.1.	Análise granulométrica	25
4.2.2.	Baridade.....	28

4.2.3.	Superfície específica	30
4.2.4.	Difração de Raios X.....	31
4.2.5.	Análise termogravimétrica	34
4.2.6.	Avaliação da reatividade pozolânica – Ensaio modificado de Chapelle.....	37
4.3.	Ensaio às argamassas no estado fresco	40
4.3.1.	Análise dos traços e composições	40
4.3.2.	Consistência por espalhamento	40
4.4.	Ensaio às argamassas no estado endurecido.....	42
4.4.1.	Módulo de elasticidade dinâmico	42
4.4.2.	Resistência à tração por flexão	45
4.4.3.	Dureza superficial.....	48
4.4.4.	Resistência à compressão	51
4.4.5.	Condutibilidade térmica	54
4.4.6.	Velocidade de propagação de ultra-sons	58
4.4.7.	Absorção de água por capilaridade.....	60
4.4.8.	Secagem	67
4.4.9.	Absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten).....	74
4.4.10.	Resistência ao ataque por sulfatos	80
4.4.11.	Porosidade aberta	91
4.4.12.	Porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP)	95
4.4.13.	Caracterização química e mineralógica.....	100
5.	Discussão de Resultados	125
5.1.	Quadros síntese	125
5.2.	Avaliação das tendências.....	128
5.2.1.	Entre composições	128
5.2.2.	Entre curas.....	129
5.2.3.	Entre idades	131
5.2.4.	Cruzamento de resultados	131
5.3.	Comparação com trabalhos semelhantes.....	135
5.4.	Avaliação final das argamassas	137
6.	Conclusões	141
6.1.	Considerações finais.....	141
6.2.	Desenvolvimentos futuros	143
	Referências Bibliográficas	145
	Anexos	151
	Anexo I – Ficha técnica da cal NHL 3.5 da Secil.....	153
	Anexo II – Ficha técnica do metacaulino M-1200S da Imerys	155

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro.3.1 – Composição química da cal hidráulica natural NHL 3.5, fornecido pela Secil.....	18
Quadro 3.2 – Composição química do metacaulino.....	18
Quadro 3.3 – Composições das argamassas	20
Quadro 4.1 – Baridade dos constituintes das argamassas.....	30
Quadro 4.2 – Superfície específica.....	31
Quadro 4.3 – Compostos cristalinos identificados nas matérias-primas	34
Quadro 4.4 – Teores de portlandite e calcite	36
Quadro 4.5 – Volume médio de HCl gasto na titulação das soluções em branco e com amostra	39
Quadro 4.6 – Quantidade de Ca(OH)_2 fixado (mg)	39
Quadro 4.7 – Traço volumétrico, traços ponderais, relação água/ligante e espalhamento.....	40
Quadro 4.8 – Compostos identificados nas argamassas sujeitas a cura H nas duas idades	103
Quadro 4.9 – Compostos identificados nas argamassas sujeitas a cura St nas duas idades.....	105
Quadro 4.10 – Compostos identificados nas argamassas sujeitas a cura SP nas duas idades	107
Quadro 4.11 – Compostos identificados nas argamassas da cura H após contaminação por sulfatos.....	112
Quadro 4.12 – Compostos identificados nas argamassas da cura St após contaminação por sulfatos.....	112
Quadro 4.13 – Compostos identificados nas argamassas da cura SP após contaminação por sulfatos.....	112
Quadro 4.14 – Teores de portlandite e calcite na cal e na argamassa de referência	114
Quadro 4.15 – Variações de massa nas diversas gamas de temperatura, para as argamassas aos 28 e 90 dias.....	121
Quadro 4.16 – Taxas de hidratação nas diversas condições de cura aos 28 e 90 dias	121
Quadro 5.1 – Valores de resistências mecânicas aos 28 e 90 dias.....	125
Quadro 5.2 – Resultados do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico aos 28 e 90 dias	125
Quadro 5.3 – Resultados da taxa de secagem e do índice de secagem aos 28 e 90 dias.....	126
Quadro 5.4 – Resultados de porosidade (por método hidrostático e MIP) e condutibilidade térmica aos 28 e 90 dias	126
Quadro 5.5 – Resultados de porosidade, condutibilidade térmica, velocidade de ultra-sons e dureza superficial do revestimento dos tijolos	127
Quadro 5.6 – Resultados do ensaio dos tubos de Karsten ao revestimento dos tijolos.....	127
Quadro 5.7 – Classificação das propriedades das argamassas de reboco endurecidas.....	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Constituintes secos das argamassas	19
Figura 3.2 – Processo de amassadura	20
Figura 3.3 – Aplicação de óleo descofrante nos moldes	21
Figura 3.4 – Moldagem dos provetes prismáticos de argamassa	21
Figura 3.5 – Aplicação de argamassa no tijolo e provete de argamassa em tijolo	22
Figura 4.1 – Curvas granulométricas das areias e do resíduo cerâmico.....	27
Figura 4.2 – Distribuição do tamanho das partículas de três amostras de resíduo cerâmico analisado por difração a laser	29
Figura 4.3 – Ensaio de baridade.....	30
Figura 4.4 – Enchimento do porta-amostras	32
Figura 4.5 – Difrátometro de Raios X	32
Figura 4.6 – Difratograma da cal NHL3.5	33
Figura 4.7 – Difratograma do metacaulino	33
Figura 4.8 – Difratograma do resíduo cerâmico	33
Figura 4.9 – Análise termogravimétrica	35
Figura 4.10 – Curvas dTG da cal, do metacaulino e do resíduo cerâmico	36
Figura 4.11 – Ensaio de chapelle	37
Figura 4.12 – Diferenças de cor das várias soluções	38
Figura 4.13 – Procedimento de realização do ensaio de consistência por espalhamento.....	41
Figura 4.14 – Relação água/ligante e consistência por espalhamento	41
Figura 4.15 – Sequência de ensaios realizados aos provetes prismáticos	42
Figura 4.16 – Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.....	43
Figura 4.17 – Módulo de elasticidade dinâmico	44
Figura 4.18 – Ensaio de resistência à tração por flexão.....	46
Figura 4.19 – Resistência à tração aos 28 dias	47
Figura 4.20 – Resistência à tração aos 90 dias	47
Figura 4.21 – Evolução com a idade das resistências à tração.....	48
Figura 4.22 – Durómetro	50
Figura 4.23 – Dureza superficial pelos métodos do esclerómetro e do durómetro.....	50
Figura 4.24 – Ensaio de resistência à compressão.....	51
Figura 4.25 – Resistência à compressão aos 28 dias	53
Figura 4.26 – Resistência à compressão aos 90 dias	53
Figura 4.27 – Evolução com a idade das resistências à compressão.....	53
Figura 4.28 – Disposição dos pontos de medição de condutibilidade térmica nos tijolos.....	54
Figura 4.29 – Medição de condutibilidade térmica no provete e no tijolo revestido.....	55
Figura 4.30 – Condutibilidade térmica aos 28 dias.....	56
Figura 4.31 – Condutibilidade térmica aos 90 dias.....	56

Figura 4.32 – Evolução com idade da condutibilidade térmica.....	57
Figura 4.33 – Condutibilidade térmica medida nos tijolos	57
Figura 4.34 – Pontos para leituras de propagação de ultra-sons.....	58
Figura 4.35 – Ensaio de propagação de ultra-sons.....	59
Figura 4.36 – Velocidades de propagação de ultra-sons	60
Figura 4.37 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	61
Figura 4.38 – Curvas de capilaridade aos 28 dias	63
Figura 4.39 – Curvas de capilaridade aos 90 dias	63
Figura 4.40 – Coeficiente de capilaridade aos 28 dias.....	64
Figura 4.41 – Coeficiente de capilaridade aos 90 dias	65
Figura 4.42 – Evolução com a idade do coeficiente de capilaridade	65
Figura 4.43 – Valor assintótico aos 28 dias	66
Figura 4.44 – Valor assintótico aos 90 dias	66
Figura 4.45 – Evolução com a idade do valor assintótico.....	67
Figura 4.46 – Ensaio de secagem	68
Figura 4.47 – Curva de secagem aos 28 dias.....	70
Figura 4.48 – Curva de secagem aos 90 dias.....	70
Figura 4.49 – Taxa de secagem aos 28 dias	71
Figura 4.50 – Taxa de secagem aos 90 dias	71
Figura 4.51 – Evolução com a idade da taxa de secagem	72
Figura 4.52 – Índice de secagem aos 28 dias.....	73
Figura 4.53 – Índice de secagem aos 90 dias.....	73
Figura 4.54 – Taxa de secagem: evolução com a idade	74
Figura 4.55 – Ensaio dos tubos de Karsten	75
Figura 4.56 – Destaque total da argamassa NHL_10T+10Mk.....	75
Figura 4.57 – Destaque parcial da argamassa NHL_10T.....	76
Figura 4.58 – Quantidade máxima de água absorvida em 60 minutos	77
Figura 4.59 – Quantidade de água absorvida ao longo do ensaio.....	78
Figura 4.60 – Coeficientes de absorção de água após 5, 10, 15, 30 e 60 minutos de ensaio	79
Figura 4.61 – Preparação da solução de Na ₂ SO ₄	81
Figura 4.62 – Provetes imersos na solução de Na ₂ SO ₄	81
Figura 4.63 – Evolução de degradação dos provetes da NHL_5T+10Mk_H.....	82
Figura 4.64 – Eflorescências ilustrando o elevado teor de sais da contaminação dos provetes.....	82
Figura 4.65 – Ciclo 9 do ensaio de resistência aos sulfatos aos 90 dias de idade	83
Figura 4.66 – Resistência ao ataque por sulfatos aos 28 dias.....	85
Figura 4.67 – Resistência ao ataque por sulfatos – comparação entre composições aos 28 dias.....	86
Figura 4.68 – Resistência ao ataque por sulfatos – comparação entre curas aos 28 dias	87
Figura 4.69 – Resistência ao ataque por sulfatos aos 90 dias.....	88
Figura 4.70 – Resistência ao ataque por sulfatos: evolução com a idade.....	90
Figura 4.71 – Ensaio de porosidade aberta	91

Figura 4.72 – Porosidade aberta aos 28 dias	93
Figura 4.73 – Porosidade aberta aos 90 dias	93
Figura 4.74 – Evolução com a idade da porosidade aberta.....	94
Figura 4.75 – Pormenores do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio	95
Figura 4.76 – Porosidade das argamassas pelo MIP e pelo método da pesagem hidrostática	97
Figura 4.77 – Porosidade por MIP das argamassas nos tijolos e nos provetes sujeitos a cura SP	97
Figura 4.78 – Distribuição do diâmetro de poros das argamassas com cura H.....	98
Figura 4.79 – Distribuição do diâmetro de poros das argamassas com cura St.....	98
Figura 4.80 – Distribuição do diâmetro de poros das argamassas com cura SP	99
Figura 4.81 – Distribuição do diâmetro de poros das argamassas aplicadas no tijolo cerâmico.....	99
Figura 4.82 – Difratoograma das composições sujeitas a cura H aos 28 dias	102
Figura 4.83 – Difratoograma das composições sujeitas a cura H aos 90 dias	102
Figura 4.84 – Difratoogramas das composições sujeitas a cura St aos 28 dias.....	104
Figura 4.85 – Difratoogramas das composições sujeitas a cura St aos 90 dias.....	104
Figura 4.86 – Difratoogramas das composições sujeitas a cura SP aos 28 dias	106
Figura 4.87 – Difratoogramas das composições sujeitas a cura SP aos 90 dias	106
Figura 4.88 – Difratoogramas das argamassas de referência nas curas H, St e SP	108
Figura 4.89 – Difratoogramas das argamassas NHL_5T nas curas H, St e SP	108
Figura 4.90 – Difratoogramas das argamassas NHL_5T+5Mk nas curas H, St e SP.....	109
Figura 4.91 – Difratoogramas das argamassas NHL_10T+10Mk nas curas H, St e SP.....	109
Figura 4.92 – Difratoogramas da argamassa NHL_5T+10Mk aos 28 e 90 dias.....	110
Figura 4.93 – Difratoogramas da argamassa NHL_5T_H antes e depois dos sulfatos	111
Figura 4.94 – Difratoogramas da argamassa NHL_5T+10Mk_H antes e depois dos sulfatos	111
Figura 4.95 – Preparação da amostra global das argamassas.....	113
Figura 4.96 – Curvas dTG das argamassas da cura H aos 28 dias.....	118
Figura 4.97 – Curvas dTG das argamassas da cura H aos 90 dias.....	118
Figura 4.98 – Curvas dTG das argamassas da cura St aos 28 dias.....	119
Figura 4.99 – Curvas dTG das argamassas da cura St aos 90 dias.....	119
Figura 4.100 – Curvas dTG das argamassas da cura SP aos 28 dias.....	120
Figura 4.101 – Curvas dTG das argamassas da cura SP aos 28 dias.....	120
Figura 4.102 – Taxas de carbonatação, Ca(OH) ₂ livre e de reação pozolânica	122
Figura 4.103 – Taxas de carbonatação, Ca(OH) ₂ livre e de reação pozolânica da cura H aos 90 dias	123
Figura 5.1 – Difratoogramas da NHL_5T+10Mk nas três curas aos 28 dias	133
Figura 5.2 – Difratoogramas da NHL_5T+10Mk aos 28 e 90 dias.....	133
Figura 5.3 – Curva dTG da NHL_10T+10Mk aos 90 dias.....	135
Figura 5.4 – Difratoogramas da NHL_10T+10Mk aos 28 e 90 dias.....	135
Figura 5.5 – Critérios de classificação de argamassas para rebocos e refechamento de juntas por Veiga (2010).....	138
Figura 5.6 – Valores de Rc e CC para classificação de argamassas segundo NP EN 998-1:2010 ...	139

Figura 5.7 – Valores de λ para classificação de argamassas segundo NP EN 998-1:2010.....140

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e motivações

Atualmente em Portugal assiste-se a um decréscimo da construção de novos edifícios. No entanto é expectável que as intervenções de reabilitação e conservação de edifícios antigos tendam a aumentar significativamente, havendo assim uma maior necessidade de investir no conhecimento e na investigação a esse nível.

Em grande parte dos edifícios existentes verificam-se deficiências e deterioração nos rebocos exteriores, tanto nos edifícios mais antigos, como nos mais recentes. Dado que o reboco tem um papel fundamental na proteção da alvenaria, permitindo-lhe o adequado desempenho da sua função, é essencial a sua conservação e/ou renovação. A melhor opção seria aplicar estratégias de conservação; no entanto, quando o estado de degradação é muito avançado, e quando se verificam grandes destacamentos, não é possível ou viável conservar. Torna-se necessário proceder a uma substituição parcial ou total do reboco [VEIGA *et al.*, 2009]. Além disso, as intervenções de conservação muitas vezes não são justificáveis quando se trata edifícios cujo valor arquitetónico e cultural seja baixo, visto que os custos e as dificuldades técnicas (a nível de equipamentos e mão-de-obra especializada) podem ser elevados [SANTOS *et al.*, 2012].

A renovação de um reboco apresenta-se como um desafio, logo à partida na escolha dos materiais e técnicas de construção a utilizar. As alvenarias antigas são constituídas por materiais muito porosos, apresentam baixas resistências mecânicas, são aliás muito deformáveis, apresentam facilidade para a absorção de água mas também maior facilidade em secar [SANTOS *et al.*, 2012]. Os rebocos antigos eram produzidos com ligantes baseados em cal aérea, apresentando características semelhantes às dos suportes. No entanto, com o desenvolvimento do cimento Portland, que confere às argamassas resistências mecânicas bastante superiores e num curto espaço de tempo, a cal aérea caiu em desuso e a mão-de-obra especializada foi desaparecendo. Hoje em dia verifica-se frequentemente a aplicação de argamassas baseadas em cimento sobre alvenarias antigas. O problema está no facto dessas argamassas não serem compatíveis com suportes antigos, quer do ponto mecânico, mas também físico e químico, verificando-se uma degradação do estado de conservação dos rebocos antigos e ainda da alvenaria [SANTOS *et al.*, 2012; VEJMKOVÁ *et al.*, 2012].

Assim os materiais a adotar na renovação de um reboco devem ser o mais possível semelhantes e compatíveis com os suportes existentes e os rebocos originalmente aplicados. As argamassas de cal aérea são adequadas à substituição do reboco de uma alvenaria antiga, garantindo, quando bem executadas, a sua conservação. Em contrapartida, o seu endurecimento ocorre de forma lenta, apenas quando em contacto direto com o ar e sem contacto com água líquida ou humidades relativas muito elevadas; isto porque o endurecimento e conseqüente aumento das resistências

mecânicas ocorre por carbonatação, que é um processo moroso [FARIA *et al.*, 2008; SANTOS *et al.*, 2012].

Nos últimos anos têm sido utilizadas argamassas bastardas de cal aérea com teores mínimos de cimento, permitindo assegurar uma maior compatibilidade com as alvenarias, mas conferindo à argamassa propriedades hidráulicas que permitem o seu endurecimento mesmo em ambientes muito húmidos e de forma mais rápida. No entanto, apesar de aceitáveis, tais argamassas não são muito recomendáveis uma vez que os iões alcalinos e os sulfatos presentes no cimento contaminam a argamassa com sais solúveis, que conduzem também a uma degradação da alvenaria [VEIGA *et al.*, 2009]. Atualmente é aceite a solução de produzir argamassas com pozolanas, sejam estas de origem natural ou artificial. As pozolanas são materiais com propriedades hidráulicas que se tornam reativas quando hidratadas, permitindo que as argamassas cal-pozolana possam endurecer sem ser impreterível o contacto com o ar e originando argamassas muito mais duráveis [FARIA-RODRIGUES, 2004; TORRACA, 2009; VEJMEJKOVÁ *et al.*, 2012]. Vários estudos têm sido desenvolvidos no sentido de caracterizar o comportamento das argamassas de cal com pozolanas tais como o metacaulino, uma pozolana artificial [VEIGA *et al.*, 2009; FARIA-RODRIGUES, 2009].

A cal hidráulica natural é um ligante com características intermédias entre o cimento e a cal aérea. Por um lado é uma cal, apresentando as argamassas com ela produzidas resistências mecânicas baixas comparativamente às de cimento Portland, e são potencialmente mais compatíveis com as alvenarias antigas; por outro lado, apresenta hidraulicidade o que a torna mais resistente que a cal aérea, nomeadamente a endurecimento sob condições de elevada humidade relativa ou fraco contacto com dióxido de carbono. A entrada em vigor da nova norma NP EN 459-1:2011 de classificação das cals [IPQ, 2011], em Julho de 2012, levou a uma produção mais rigorosa de cal hidráulica natural (NHL), que além ser produzida a temperatura mais baixa, deixou de poder incorporar quaisquer adições [FARIA *et al.*, 2012a], sendo portanto uma solução muito mais vantajosa para a área da conservação dos edifícios antigos que as anteriores cals hidráulicas “naturais”.

Vários materiais têm vindo a ser utilizados como pozolanas pelo Homem. Muitos desses materiais são subprodutos industriais que, pelo facto de terem uma composição silico-aluminosa e/ou por terem sofrido tratamentos térmicos, têm essa potencialidade. Também diversos resíduos cerâmicos têm vindo a ser estudados como substituição de ligante ou do agregado, ou ainda como adição em argamassas à base de cal [FARIA-RODRIGUES, 2009; MATIAS *et al.*, 2010; CRUZ, 2012] ou de cimento [BINICI *et al.*, 2012; PEREIRA-DE-OLIVEIRA *et al.*, 2012]. Esses estudos têm permitido conhecer o comportamento do material em argamassas e avaliar a sua reatividade pozolânica e efeito filler (no caso de granulometrias menores). A adoção de resíduos cerâmicos contribui ainda para produzir argamassas mais sustentáveis, uma vez que permite diminuir o teor de ligante e possibilita que o resíduo seja reutilizado.

1.2. Objetivos e metodologia

A presente dissertação visa avaliar as características de argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 com substituições de massa de cal por resíduo cerâmico e metacaulino. Pretende-se, por um lado, contribuir para um maior conhecimento de argamassas realizadas com uma cal hidráulica natural de produção nacional e de formulação recente, de acordo com a nova versão da norma NP EN 459-1 [IPQ, 2011] e, por outro lado, avaliar as possibilidades de otimização das características de argamassas com base nesta cal através da introdução de um resíduo cerâmico ou desse resíduo juntamente com um metacaulino.

Pretende-se demonstrar se este tipo de argamassas, mais sustentáveis, são eficientes tecnicamente para aplicações nomeadamente na reabilitação de edifícios antigos.

Com base nestes pressupostos foi desenvolvida uma ampla campanha experimental, enquadrada no âmbito dos projetos financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia METACAL (PTDC/ECM/100431/2008) e “Incorporação de resíduos de cerâmica em argamassas de reabilitação” (EXPL/ECM-COM/0928/2012), em que foram realizadas seis composições de argamassas, todas com traço volumétrico 1:3 de ligante (NHL3.5+resíduo cerâmico+metacaulino):areia. Avaliou-se o comportamento das diferentes composições entre si e em relação à argamassa de referência (apenas constituída por NHL3.5 e areia), como também a influência das condições de cura a que as argamassas foram submetidas e a sua evolução com idade até aos 90 dias.

Foi realizada a caracterização dos constituintes das argamassas, nomeadamente da NHL 3.5, do resíduo cerâmico, do metacaulino e ainda das areias em relação à sua granulometria. A caracterização das argamassas foi efetuada através da análise das suas propriedades mecânicas, físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais.

1.3. Estrutura e organização do texto

O texto foi dividido em seis capítulos (introdução, estado do conhecimento, desenvolvimento da campanha experimental, ensaios e resultados de caracterização, discussão de resultados e conclusão e anexos). No presente capítulo, é feito um enquadramento ao tema e são apresentadas as motivações e as problemáticas que justificam a necessidade da investigação. São também apresentados os objetivos da dissertação.

No segundo capítulo, correspondente ao estado dos conhecimentos, é feita uma revisão teórica em torno da problemática e das investigações que têm sido realizadas em relação ao tema em estudo. No capítulo são abordados os seguintes pontos:

- Constituintes das argamassas (ligante, pozolanas e agregados).
- Argamassas de substituição (características de alvenarias e rebocos antigos, materiais utilizados nas argamassas de substituição, escolha adequada das argamassas

de substituição – critérios de compatibilidade/ características exigidas às argamassas/ fatores que influenciam o comportamento das argamassas).

- Argamassas baseadas em cais com pozolanas.

No terceiro capítulo é apresentado o desenvolvimento da campanha experimental, sendo descritos os constituintes das argamassas, as amassaduras, a preparação de provetes e as condições de cura a que os provetes foram submetidos.

No quarto capítulo são apresentados e descritos os ensaios realizados, incluindo os ensaios realizados aos constituintes e às argamassas no estado fresco e no estado endurecido. São ainda apresentados e analisados os resultados obtidos.

No quinto capítulo é feita a discussão de resultados em que são cruzados todos os parâmetros estudados, comparados os seus resultados, e verificadas as influências das características dos constituintes no comportamento das argamassas entre vários parâmetros. Neste capítulo são ainda comparados os resultados obtidos com os de outros trabalhos similares e finalmente avaliadas as argamassas segundo os critérios definidos para a sua aplicação em substituição de rebocos ou refechamento de juntas em alvenarias antigas [VEIGA, 2010] e pelos critérios da norma NP EN 998-1:2010 [IPQ,2010].

Por fim no último capítulo são referidas as conclusões retiradas do estudo e sugeridas algumas linhas de investigação futura. São ainda apresentadas, em anexo, as fichas técnicas da cal NHL 3.5 e do metacaulino.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. Constituintes das argamassas

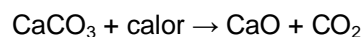
2.1.1. Ligantes – Cal hidráulica natural

2.1.1.1 Origem e produção

Existem dois tipos de ligantes: os hidrófobos, de natureza orgânica, e os hidrófilos que se subdividem em aéreos, como a cal aérea e o gesso, e hidráulicos, dos quais são exemplos comuns o cimento e a cal hidráulica. Entre os vários tipos de cais e o cimento, o que varia essencialmente nas suas composições são os teores de carbonato de cálcio (CaCO_3) e de argilas. O carbonato de cálcio é o principal constituinte do calcário. Quando o seu teor é superior a 95%, a pedra calcária é considerada pura e a cal formada pela sua cozedura é considerada aérea. A característica fundamental deste ligante é o seu endurecimento ser originado por reação do Ca(OH)_2 com o dióxido de carbono (CO_2), pelo que uma argamassa baseada em cal aérea, sem qualquer componente hidráulico, não faz presa quando imersa e o endurecimento é muito moroso quando exposta a elevadas humidades relativas.

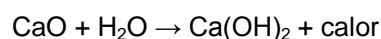
Por outro lado os ligantes hidráulicos, além do Ca(OH)_2 têm ainda na sua composição argilas e, dependendo do seu teor (sempre superior a 5%), serão mais ou menos hidráulicos. A cal hidráulica natural é um ligante hidráulico que resulta da cozedura de calcário margoso com teor de argila entre 5% e 20%. Os cimentos têm um ainda maior teor de argila, resultando os cimentos naturais da cozedura de marga calcária. A característica principal dos ligantes hidráulicos prende-se com o facto de o seu endurecimento acontecer devido a uma reação entre o ligante e a água, pelo que não é necessário o contacto com o ar, podendo até endurecer quando imersos.

A cal aérea cálcica é produzida pela calcinação de rocha calcária pura a temperaturas na ordem dos 900°C . Daí resultam o óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO_2) que se liberta:



Equação 2.1

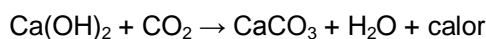
O CaO é designado por cal aérea viva. Visto que a cal viva é muito reativa e instável é necessária a sua extinção, que acontece por hidratação. A hidratação pode ocorrer por imersão da cal viva ou pela sua aspersão com água. O produto resultante da reação do óxido de cálcio com a água é o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Esta reação é fortemente exotérmica, libertando grandes quantidades de calor e vapores cáusticos, pelo que exige cuidado acrescido na sua execução [FARIA-RODRIGUES, 2004]:



Equação 2.2

A extinção por imersão origina uma pasta com elevada plasticidade. Assim é possível produzir uma argamassa apenas pela mistura da cal em pasta com areia, obtendo dessa forma uma argamassa de boa qualidade sem a adição de água [FARIA *et al.*, 2008; TORRACA, 2009]. A trabalhabilidade deste tipo de argamassa exige mão-de-obra qualificada.

O endurecimento de uma argamassa com base em cal aérea dá-se por uma reação de carbonatação; daí a necessidade da argamassa estar diretamente em contacto com o ar durante a sua presa:



Equação 2.3

A cal hidráulica natural resulta da calcinação, a temperaturas na ordem dos 900°C a 1200°C, de calcários com um teor máximo de 20% de argilas magras, dependendo assim a sua produção da natureza e da mineralogia da rocha calcária. As argilas constituídas maioritariamente por sílica e alumina originam, durante a calcinação a temperaturas entre 850°C a 1100°C, a combinação dos seus elementos químicos com a cal viva, formando silicato bicálcico, C₂S (belite), composto mais proeminente, e aluminato tricálcico, C₃A (celite), compostos estes que vão conferir propriedades hidráulicas, o que as diferencia das cals aéreas [FARIA *et al.*, 2012a; SEQUEIRA *et al.*, 2007].

No caso da cal hidráulica natural também é necessário proceder previamente à extinção da cal viva com água, transformando-se o óxido de cálcio em hidróxido de cálcio (Ca[OH]₂ – portlandite).

A presa da cal hidráulica natural ocorre em duas fases. A fase inicial é principalmente hidráulica, ocorrendo a hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio, possibilitando o ganho de consistência da argamassa e levando ao seu endurecimento. A segunda fase ocorre a longo prazo e é uma fase aérea em que ocorre a carbonatação da argamassa, isto é, a reação entre o hidróxido de cálcio da cal e o dióxido de carbono atmosférico [LANAS *et al.*, 2004; SEQUEIRA *et al.*, 2007].

2.1.1.2 *Classificação de cals hidráulicas naturais segundo norma NP EN 459-1:2011*

A norma NP EN 459-1:2011 [IPQ, 2011], resultante da norma Europeia EN 459-1:2010 [CEN, 2010], entrou em vigor pleno em Julho de 2012 e veio redefinir as cals com propriedades hidráulicas. Por consequência, a produção de cals hidráulicas naturais (NHL) tornou-se mais rigorosa, uma vez que até ao momento o seu fabrico obedecia à norma NP EN 459-1:2002 [IPQ, 2002], resultando da EN 459-1:2001 [CEN, 2001], sendo essa uma norma pouco limitativa na classificação de cals hidráulicas [FARIA *et al.*, 2012c; GRILO, 2013].

As características das cals com propriedades hidráulicas dependem da proporção de calcário e argila, da temperatura de calcinação e da sua extinção. Assim, as cals hidráulicas são consideradas muito heterogéneas, sendo possível verificar uma grande variabilidade de composições se a produção não for rigorosa [VEIGA *et al.*, 2010]. Teutonico *et al.* [1994] avaliaram as características de argamassas de cals hidráulicas e concluíram que “os resultados foram extremamente inconsistentes dependendo muito do tipo de cal hidráulica utilizada na mistura”.

Antes da entrada em vigor da norma NP EN 459-1:2011 muitas cais hidráulicas eram consideradas “naturais”; no entanto, atualmente, para terem tal classificação as cais não podem ter adições. Esta nova norma impôs limites rigorosos à produção de NHL, quer em termos de constituintes, quer de processo de fabrico; muitas das antigamente denominadas cais hidráulicas “naturais” passaram a ser designadas apenas por cais hidráulicas (HL), não “naturais”. As cais hidráulicas que incorporem adições minerais ou tenham mistura de cimento passaram assim a ser designadas como cais hidráulicas (HL) ou cais formuladas (FL) [FARIA *et al.*, 2012a].

2.1.2. Agregados - areias

Entre os constituintes das argamassas, os agregados, geralmente constituídos por areias, são os que estão presentes em maior quantidade. Estes influenciam significativamente o comportamento da argamassa pelo que é importante o seu estudo, apesar de não ser tão frequente quanto o dos ligantes [RATO, 2006]. As areias utilizadas no desenvolvimento experimental deste trabalho não são alvo de estudo aprofundado; no entanto é relevante referir a influência que as areias têm nas propriedades das argamassas.

As areias são oriundas de agregados de origem mineral. Em relação à sua constituição mineralógica, estas podem ser distinguidas em siliciosas, quando provenientes de rio ou de areeiro, ou calcárias, quando derivam da britagem de desperdícios de pedreiras de rocha calcária. Geralmente as primeiras, resultantes da desagregação de rochas, são designadas por “areia natural” e as segundas por “areia britada”. Por vezes as areias podem conter algum teor de argilas. Esse teor confere à argamassa na qual a areia está aplicada, maior trabalhabilidade e resistência mecânica. No entanto, pode reduzir a ligação cal-areia, exigindo assim uma maior quantidade de água na amassadura, o que pode ter um efeito negativo, por conduzir ao aumento da retração da argamassa. [FARIA-RODRIGUES, 2004; RATO, 2006].

A distribuição granulométrica e a forma das partículas são fatores que influenciam a compacidade e a estrutura porosa da argamassa, pelo que representam um papel fundamental no seu comportamento, nas suas características e na sua durabilidade [SANTOS *et al.*, 2012; RATO, 2006].

No que respeita à forma das partículas, estas podem ser mais angulosas ou esféricas. Tal característica influencia a aderência da pasta de ligante ao agregado e a superfície específica da areia, condicionando a quantidade de água que é necessário a aplicar na amassadura. Em relação à dimensão das partículas, as areias têm uma granulometria compreendida, em geral, entre 0,063 e 4 mm [RATO, 2006]. A granulometria das partículas deve ser o mais otimizada possível no sentido da curva granulométrica ser extensa, isto é, a areia deve ser bem graduada de forma a promover um bom arranjo das partículas [MARGALHA *et al.*, 2007]. Esse arranjo é resultado da existência de partículas de várias dimensões e da forma dessas partículas, de forma a facilitar o preenchimento dos vazios, contribuindo assim para o aumento da compacidade e conseqüentemente produzindo uma argamassa com melhor trabalhabilidade e maiores resistências mecânicas [MELO *et al.*, 2010; CARNEIRO, 2012]. No entanto há que ter em consideração que o facto de se ter uma argamassa com uma estrutura de poros menores, apesar de ter melhor resistência mecânica, terá menor capacidade

de secagem, porque os poros de menor dimensão têm maiores pressões capilares, dificultando a saída de água [HENRIQUES *et al.*, 2008].

2.1.3. Pozolanas

As pozolanas foram materiais extensivamente utilizados no passado, com o objetivo de obter argamassas com propriedades hidráulicas a partir dos ligantes aéreos existentes. Segundo os historiadores, o resíduo cerâmico foi usado desde a civilização Fenícia. No entanto, foi na Era Romana que se registou o seu uso intensivo, do qual restam ainda hoje vários vestígios por toda a Europa e Bacia Mediterrânica de argamassas de cal hidratada com resíduos de tijolo em pavimentos, rebocos e juntas. Da Era Romana existem ainda vestígios da utilização de pozolanas naturais, nomeadamente em locais do Império onde estas estavam disponíveis [BARONIO *et al.*, 1997].

As pozolanas podem ser naturais, de origem vulcânica, ou artificiais, produzidas pela cozedura de materiais naturais, tais como argilas. No caso das pozolanas artificiais, a reatividade pozolânica depende do tratamento térmico, em termos da temperatura e tempo de cozedura dos materiais, e da sua superfície específica. A temperatura a que as matérias-primas são cozidas afeta a constituição mineralógica e a morfologia do material. Quanto mais elevados os teores de sílica e alumina, maior a reatividade da pozolana. Por outro lado se esses constituintes estiverem no estado amorfo, maior ainda será a sua reatividade [MATIAS *et al.*, 2010]. No caso das argilas, a temperatura de cozedura ideal está no intervalo entre os 600°C e os 800°C. O ganho de reatividade advém da destruição pelo aquecimento da estrutura cristalina das argilas, o qual origina alumino-silicatos com estrutura amorfa [KAVAS *et al.*, 2008].

A reatividade das pozolanas está intrinsecamente relacionada com a capacidade destas reagirem, à temperatura ambiente e na presença da água, com a cal, formando produtos insolúveis com características ligantes [BARONIO *et al.*, 1997]. Assim, os alumino-silicatos no estado amorfo, quando reagem com o hidróxido de cálcio da cal produzem silicatos de cálcio hidratados e/ou aluminatos de cálcio hidratados na interface cal-pozolana [KAVAS *et al.*, 2008]. Estes compostos, além de características hidráulicas, aumentam a durabilidade das argamassas [VEJMEJKOVÁ, 2012].

Em Portugal, as pozolanas para argamassas são classificadas pela norma NP 4220:2010 [IPQ, 2010a]. A utilização de pozolanas como adição ou em substituição de ligante nas argamassas com base em cal, permite melhorar as características das argamassas, mantendo-as compatíveis, química e fisicamente, com as argamassas das alvenarias antigas [VEIGA *et al.*, 2010]. No caso particular de argamassas de cal aérea, em que o endurecimento só acontece por reações de carbonatação (o que exige que a argamassa esteja em contacto com o ar), a utilização de pozolanas permite aplicar as argamassas em locais com fraco contacto com o ar ou em que a humidade relativa seja mais elevada [FARIA *et al.*, 2012a].

2.1.3.1 Metacaulino

O metacaulino é uma pozolana artificial que resulta da calcinação do mineral caulinite, a temperaturas entre 600 e 900°C. O material que daí resulta é praticamente amorfo e fortemente reativo [FARIA-RODRIGUES, 2004; KAVAS *et al.*, 2007].

Em Portugal o metacaulino é um material ainda com pouca visibilidade e pouco utilizado; no entanto, visto que existem muitas reservas de caulinos, e que estes são ainda um resíduo obtido da lavagem de areias caulínicas, há um elevado potencial para produção de metacaulino nacional [GRILO, 2013; FARIA, 2012b; VELOSA, 2013]. Por outro lado, os metacaulinos são pozolanas muito reativas e mais sustentáveis do que os ligantes tradicionais, visto que a sua temperatura de calcinação pode ser inferior à dos ligantes baseados no calcário, pelo que é conveniente a sua utilização como substituição parcial do ligante.

2.1.3.2 Resíduo cerâmico

O resíduo cerâmico, como referido anteriormente, é usado em argamassas desde a antiguidade. Semelhantemente ao uso que se dá ao resíduo nos tempos atuais, já na antiguidade o resíduo era aplicado em argamassas de cal com o propósito de criar reações pozolânicas com a cal [TEUTONICO, 1994]. Em Conímbriga foram encontradas argamassas com resíduos cerâmicos que datam da Era Romana. Tais argamassas apresentam elevada durabilidade, visto terem estado enterradas durante cerca de dois milénios. Na Torre do Rio e no Criptopórtico em Mértola também foi detetada a presença de resíduos cerâmicos nas argamassas, datadas da mesma época. Também em Troia, nos vestígios da civilização romana, foram encontrados os mesmos resíduos. Conclui-se assim que era muito comum o recurso a tal resíduo nas argamassas nessa época [VELOSA, 2007; SANTOS SILVA, 2004; SANTOS SILVA, 2006]. Segundo Sepulcre-Aguilar *et al.* (2010) na antiguidade utilizavam-se tijolos e telhas esmagados como pozolanas artificiais em argamassas de cal.

Os materiais cerâmicos, à semelhança dos metacaulinos, resultam da cozedura de argilas. Geralmente é referido que na atualidade a cozedura das argilas para produção de tijolos, telhas e ladrilhos cerâmicos ocorre a temperaturas superiores a 900°C. É conhecido que a partir dos 800°C a reatividade pozolânica é afetada, diminuindo pelo facto de haver recristalizações. Assim, o material produzido a temperaturas muito elevadas não terá, à partida, muito potencial pozolânico [FARIA-RODRIGUES, 2004].

Os resíduos cerâmicos podem desempenhar duas funções distintas nas argamassas, dependendo da dimensão dos seus grãos. Quando a granulometria é grosseira, partículas com dimensões superiores a 300µm, desempenha a função de agregado poroso e introdutor de ar, facilitando o processo de carbonatação e melhorando a resistência ao gelo-degelo e à cristalização de sais. Quando a granulometria é fina, partículas com dimensões inferiores a 75µm, o resíduo pode ter potencial pozolânico e nesse caso reagirá com o hidróxido de cálcio da cal, originando argamassas hidráulicas com maior resistência e durabilidade [MATIAS *et al.*, 2010; TEUTONICO *et al.*, 1994].

O resíduo cerâmico pode ainda desempenhar a função de filler na argamassa e contribuir para a compactação da estrutura porosa. Os fillers são partículas de pequena dimensão que não reagem mas que podem influenciar a estrutura porosa da argamassa enquanto fresca e, consequentemente, as resistências mecânicas quando endurecidas [FARIA, 2012b].

A adoção dos resíduos cerâmicos em argamassas baseadas em cal poderá ser viável, tanto num contexto técnico, se permitir otimizar as características das argamassas, quanto num contexto sustentável e ambiental, uma vez que pode permitir reduzir o consumo de cal, e por consequência os consumos energéticos e os consumos de matérias-primas (calcários e margas) que lhes estão associados. A reutilização destes resíduos permite ainda reduzir a quantidade de material cerâmico depositado em aterro, uma vez que segundo Binici (2007), citado por Matias *et al.* (2010) cerca de 30% do material produzido diariamente na indústria cerâmica é desperdiçado. Os desperdícios de tijolos, telhas e ladrilhos cerâmicos utilizados na construção poderão também ser triturados e reutilizados para a produção de argamassas.

2.2. Argamassas de substituição

2.2.1. Considerações iniciais

A conservação e preservação do património histórico e arquitetónico têm sido alvo de inúmeros estudos no sentido de otimizar técnicas e materiais a empregar nessas intervenções. Os revestimentos exteriores têm elevada importância no edificado devido à sua função de proteção das paredes; no entanto, dada a sua exposição às ações climáticas, ambientais, mecânicas e biológicas, os rebocos estão bastante suscetíveis à deterioração [VEIGA *et al.*, 2010]. Quando o estado de degradação não permite a conservação de um reboco é necessário recorrer à sua substituição, seja parcial ou total. Na escolha dos materiais para a intervenção é fundamental ter em consideração as características das alvenarias e dos revestimentos pré-existentes [VEIGA *et al.*, 2009]. Uma escolha inadequada das argamassas a aplicar numa alvenaria antiga poderá conduzir a uma deterioração acelerada desta [SANTOS *et al.*, 2012].

Assim, é necessário conceber argamassas que sejam não só compatíveis com as alvenarias e cumpram a sua função de proteção, como também tenham resistência e durabilidade suficientes para garantir a sua integridade [FARIA-RODRIGUES., 2009].

Segundo Mack *et al.* (1976), citado por Sepulcre-Aguilar (2010) as argamassas de substituição devem ser mais fracas e mais permeáveis do que a alvenaria sobre a qual vão ser aplicadas e que vão proteger, e não devem ser mais fortes ou impermeáveis do que as argamassas originais, de forma a prevenir a deterioração da alvenaria.

2.2.2. Alvenarias e rebocos antigos

As paredes antigas, anteriores ao aparecimento do cimento e do betão armado, são, na sua generalidade, bastante deformáveis, constituídas por materiais muito porosos e a sua resistência mecânica é muito baixa, apesar das suas elevadas espessuras lhes conferirem boa capacidade resistente. Na sua constituição também não existem cortes de capilaridade, sendo permitida a ascensão de água por capilaridade ou por progressão da frente húmida quando chove, mas promovendo, no entanto, a sua fácil secagem. As características dessas paredes diferem bastante das que são construídas hoje em dia; no entanto a sua função de proteção contra as ações climáticas e fatores externos mantêm-se [VEIGA *et al.*, 2002].

As argamassas baseadas em cal aérea pura foram muito utilizadas desde a antiguidade nos revestimentos das alvenarias. Essas argamassas, apesar de serem as mais adequadas e compatíveis por terem características muito semelhantes às das alvenarias, também apresentam alguns inconvenientes associados à demora do processo de carbonatação da cal, o que conseqüentemente conduz a um processo de endurecimento lento, processo esse que não ocorre em contacto com a água e é ainda mais lento em ambientes muito húmidos. Como referido anteriormente, na antiguidade as pozolanas, artificiais ou naturais, foram bastante utilizadas como adição em argamassas de cal aérea para lhes conferir propriedades hidráulicas [VEIGA *et al.*, 2010; FARIA *et al.* 2008; BARONIO *et al.*, 1997].

Com o aparecimento do cimento Portland, principalmente a partir do início do século XX, a cal foi progressivamente caindo em desuso e o conhecimento de preparação, execução e aplicação das argamassas de cal, passado entre gerações de artesãos, foi-se perdendo [FARIA *et al.*, 2008]. Também a tradição da adoção de pozolanas caiu em desuso durante muito tempo [FARIA, 2012b].

2.2.3. Materiais utilizados em argamassas de substituição

Dadas as características das alvenarias antigas e das argamassas originais, maioritariamente baseadas em cal aérea, as argamassas de cal aérea seriam as mais adequadas a usar na substituição de revestimentos. No entanto, durante o moroso processo de endurecimento das argamassas de cal aérea, as resistências mecânicas são muito baixas e próximas do limite inferior estabelecido por Veiga *et al.* (2010) aumentando assim o risco das argamassas serem destruídas pelas ações externas a que estão sujeitas, antes de ganharem capacidade resistente suficiente [VEIGA *et al.*, 2010; FARIA *et al.*, 2008].

O cimento, indiferentemente ao facto de ser um ligante de elevada resistência mecânica e de endurecimento muito rápido, contrariamente à cal aérea, foi durante algumas décadas, bastante utilizado mesmo em situações de conservação de edifícios antigos e em substituições parciais ou totais de rebocos. Dadas as diferenças entre as características do cimento e dos materiais constituintes das alvenarias antigas ou das argamassas originais, com base em cal, levanta-se um problema de incompatibilidade de materiais, conduzindo esta falta de conhecimento a uma deterioração antecipada da alvenaria [FARIA *et al.*, 2008; VEIGA *et al.*, 2010; VEJMEJKOVÁ *et al.*, 2012].

As argamassas de cal hidráulica natural surgem com características intermédias. Se por um lado o endurecimento é bastante mais rápido, comparativamente às argamassas baseadas em cal aérea, e acontece mesmo quando a argamassa está imersa, por outro lado é bastante mais compatível com as alvenarias antigas do que as argamassas baseadas em cimento. Para além disto, a cal hidráulica natural é um ligante mais sustentável do que o cimento, visto que os consumos energéticos da sua produção podem ser bastante inferiores [FARIA *et al.*, 2012a].

A adoção de pozolanas nas argamassas de cal, principalmente cal aérea, permite produzir argamassas duráveis, com características hidráulicas, com resistências mecânicas suficientes e semelhantes às argamassas originalmente utilizadas [MOROPOULOU *et al.*, 2004].

2.2.4. Escolha adequada das argamassas de substituição

Quando é necessário proceder à substituição, parcial ou total, de um revestimento de um edifício antigo, é fundamental conhecer, além das características do substrato, também as características, composição e estado de conservação dos revestimentos pré-existentes. Na escolha da argamassa de substituição devem ser criteriosamente avaliadas as características das soluções e devem ter-se em conta principalmente critérios de compatibilidade com os elementos pré-existentes, de forma a evitar a sua degradação prematura [SANTOS *et al.*, 2012].

No caso de edifícios de elevado valor cultural, considerados como património histórico e arquitetónico, além dos critérios de compatibilidade, as argamassas devem cumprir requisitos funcionais e de desempenho. No caso dos requisitos funcionais, devem ter-se em conta, logo antes da escolha dos materiais, as funções para as quais a argamassa de substituição será definida, podendo enumerar-se preocupações de conservação, preocupações estéticas, estruturais, de vida de serviço e de aplicação da argamassa. Por exemplo, se é pretendida uma argamassa que tenha um papel importante na estabilidade estrutural da alvenaria, as suas propriedades mecânicas serão fundamentais na escolha da argamassa mais adequada. Assim, os requisitos impostos às argamassas vão depender da sua função [HENRIQUES, 2005].

Na escolha das argamassas de substituição devem ainda ser consideradas as condições físicas da envolvente do edifício, nomeadamente as condições climáticas (humidade, temperatura, vento e intensidade da chuva), os problemas ambientais (poluição), a proximidade ao mar (presença de sais) e a exposição do edifício à chuva e à absorção de água do solo [VEIGA *et al.*, 2010].

2.2.4.1 Critérios de compatibilidade

Segundo Santos *et al.* (2012) as argamassas compatíveis não podem contribuir para a degradação das alvenarias antigas, devem ter capacidade de proteger as paredes, devem ser reversíveis, duráveis e não descaracterizar o edifício.

A compatibilidade com os materiais pré-existentes deve ser verificada em termos mecânicos, físicos, químicos e estéticos. Quando aplicadas em paredes de edifícios antigos, seja em rebocos ou

em refechamento de juntas, as argamassas, como referido anteriormente, devem ser mais fracas do que a alvenaria, de forma a ser possível o acompanhamento dos movimentos ligeiros do edifício [FARIA-RODRIGUES, 2009; VEIGA *et al.*, 2010; LANAS *et al.*, 2004].

Como também já referido, tem sido frequente a aplicação de argamassas de cimento para substituição de argamassas antigas. Tais argamassas estão longe de ser mais fracas do que as alvenarias, sendo consideradas inadequadas e incompatíveis. As argamassas de cimento são bastante rígidas, resistentes, sofrem muita retração e fendilhação, são mais suscetíveis ao ataque de sulfatos, são bastante impermeáveis à água líquida, mas também na forma de vapor, a sua condutibilidade térmica é alta, apresentam uma porosidade aberta inferior à das argamassas baseadas em cal e a sua aderência a substratos antigos geralmente é fraca, ocorrendo a rotura pelo próprio suporte. Como as alvenarias antigas são muito deformáveis, as argamassas de cimento que sejam sobre elas aplicadas não conseguem acompanhar os movimentos, fissurando. Além disso, como as paredes antigas são bastante porosas e não têm corte de capilaridade, a água que se infiltra não tem facilidade em secar, conduzindo por esse motivo a uma deterioração acelerada da parede [VEIGA *et al.*, 2010; SEPULCRE-AGUILAR *et al.*, 2010].

2.2.4.2 Características exigidas às argamassas

Quando se considera o desempenho da argamassa existem dois papéis fundamentais a ter em conta: as características que a argamassa deve ter para assegurar a sua função de proteção do substrato, e evitar o desenvolvimento de processos de degradação, e as características que a argamassa deve ter para assegurar a sua durabilidade e a durabilidade do conjunto [FARIA *et al.*, 2008].

As características necessárias para evitar o desenvolvimento de processos de degradação e para proteger as alvenarias são [SANTOS *et al.*, 2012; HENRIQUES, 2005]:

- As argamassas devem oferecer alguma resistência à penetração da água até ao suporte; assim, a absorção capilar deve ser tão baixa quanto possível, quer em termos de velocidade de absorção quanto de quantidade de água absorvida;
- Não devem dificultar a secagem, uma vez que a água que inevitavelmente se infiltra deve ser capaz de evaporar. Assim, a permeabilidade ao vapor de água é um fator importante; no entanto, não se deve promover uma evaporação rápida sob pena de sais presentes na água cristalizarem no interior da argamassa, formando cripto-florescências;
- As resistências mecânicas devem ser inferiores às do substrato e ter maior deformabilidade de forma a não transmitir tensões elevadas ao suporte;
- As argamassas não devem introduzir sais no suporte.

Em termos das características necessárias para assegurar a durabilidade das argamassas [SANTOS *et al.*, 2012; HENRIQUES, 2005]:

- As resistências aos sais solúveis, que possam estar presentes nas alvenarias, e aos ciclos gelo-degelo devem ser as mais elevadas possíveis;
- A evaporação da água também é importante na preservação das argamassas quando considerados os efeitos do gelo e da cristalização de sais nos poros das argamassas;
- As argamassas devem ter alguma resistência mecânica, embora inferior à do suporte onde aplicadas;
- Devem apresentar reduzida suscetibilidade à fendilhação;
- A aderência ao suporte deve ser suficiente para garantir a durabilidade da argamassa, mas não tão elevada que em caso de rotura a argamassas arraste parte do material da alvenaria consigo, degradando-a.

2.2.4.3 Fatores que influenciam o comportamento das argamassas

O comportamento das argamassas depende de diversos fatores, uns que lhe são inerentes e estão relacionados com a sua composição, e outros relacionados com fatores externos. Em relação aos fatores inerentes às argamassas, o tipo de ligante e as propriedades das areias, tais como natureza mineralógica, granulometria e forma, são fundamentais para definir as características das argamassas. Além disso, a proporção em que os constituintes são misturados, ou seja, os traços volumétricos e as quantidades de água, também influenciam bastante as propriedades finais do material; daí a necessidade não só de escolher os materiais certos a adotar, como também de otimizar as proporções em que são aplicados [RATO, 2006].

No entanto, não são apenas os constituintes das argamassas que influenciam o seu comportamento. As técnicas usadas nas amassaduras, os processos de cura e os procedimentos de aplicação, o suporte onde estão aplicadas, sobretudo em rebocos, constituem fatores externos à composição da argamassa mas que podem ser determinantes nas suas características e levar a variações significativas nas suas propriedades. No que respeita à cura das argamassas, a sua duração e as condições ambientes a que são expostas influenciam as características da matriz de ligante e portanto também a estrutura porosa [TEUTONICO *et al.*, 1994; RATO, 2006]. No caso de argamassas de cal com pozolanas as condições de cura são particularmente importantes e podem fazer toda a diferença nas características finais das argamassas [VEIGA *et al.*, 2009].

O suporte em que as argamassas são aplicadas, e em particular as suas características microestruturais, também condicionam as propriedades das argamassas, especialmente na questão do transporte de água no interior das argamassas [RATO, 2006]. Segundo Groot (2012), apesar do substrato geralmente não ser estudado, o transporte de água na argamassa é bastante influenciado pela distribuição da dimensão de poros entre o substrato e o reboco. Isto significa que se o reboco tiver poros mais finos do que os da alvenaria, terá maior capacidade de sucção capilar, portanto absorve com facilidade a água proveniente do suporte; em caso contrário a água terá tendência a ficar retida no suporte. Segundo Gonçalves *et al.* (2010) o substrato condiciona o fluxo líquido que

penetra no reboco. Além da natureza dos dois materiais condicionar a sucção relativa do reboco e do material do substrato, as condições e a técnicas de aplicação do reboco também têm influência na sucção capilar uma vez que condicionam a aderência entre ambos os materiais.

Todas as características referidas influenciam a microestrutura da argamassa, sendo desse fator que depende em grande medida o desempenho das argamassas [SANTOS, *et al.* 2012].

2.3. Argamassas baseadas em cal com pozolanas

Conhecidos os benefícios que as pozolanas têm nas argamassas, incrementando e melhorando as suas características, têm vindo ao longo dos anos a ser realizados inúmeros estudos de argamassas aditivadas ou com substituições de ligante por pozolanas, naturais ou artificiais. Existem, portanto, diversos estudos no âmbito da caracterização de argamassas de cal aérea com metacaulino ou com resíduo cerâmico. Também existem diversos estudos dessas mesmas pozolanas utilizadas em argamassas com base em cimento. No entanto, são escassos os estudos de cais hidráulicas naturais com essas pozolanas.

Matias *et al.* (2010) estudaram a utilização de resíduos de tijolo cerâmico, em granulometria fina e grossa, em argamassas baseadas em cal aérea, concluindo que, em proporções adequadas, as argamassas com resíduos cerâmicos podem ter um bom desempenho como argamassas de substituição de rebocos.

Vejmelková *et al.* (2012) caracterizaram argamassas de cal aérea com adição de metacaulino. Para um teor de substituição de 20% da massa de cal os resultados excederam os da argamassa de referência (só com cal), nomeadamente em termos de propriedades mecânicas e do coeficiente de absorção de água.

Arizzi *et al.* (2012) também caracterizaram argamassas de cal aérea com adição de metacaulino, concluindo que, para uma percentagem de 20% de metacaulino, as resistências mecânicas são bastante superiores às das argamassas de cal aérea sem pozolanas; no entanto, as argamassas com 10% de metacaulino apresentam maior porosidade e menor resistência mecânica. As argamassas com 10% de metacaulino no teor total de ligante e traço volumétrico entre 1:4 e 1:6 são, segundo estes autores, as dosagens adequadas para obter argamassas compatíveis e duráveis de substituição, tendo uma boa trabalhabilidade no estado fresco e baixa retração e resistências mecânicas adequadas (não demasiadamente elevadas).

Faria-Rodrigues (2009) avaliou o desempenho de argamassas de cal hidratada com diversas pozolanas, verificando que argamassas com componentes pozolânicas e sujeitas a cura húmida apresentam correntemente porosidade aberta superior e as propriedades mecânicas melhoram. Por outro lado, as argamassas com material cerâmico apresentaram um bom comportamento quando sujeitas ao ataque de sulfatos. Já as argamassas com metacaulino, principalmente em cura húmida, apresentam um comportamento ineficiente face aos sulfatos, o que pode ser explicado pelo desenvolvimento de aluminatos de cálcio hidratados, que expostos a sulfatos podem formar sulfoaluminatos

de cálcio hidratados, que são compostos muito expansivos e destrutivos, que levam à degradação das argamassas.

Velosa *et al.* (2007) caracterizaram as argamassas romanas de Conímbriga, argamassas de cal aérea e resíduo cerâmico esmagado. Böke *et al.* (2006) caracterizaram o uso de resíduo cerâmico como agregado em argamassas antigas dos edifícios “Ottoman Bath” construídos nos séculos XIV e XV na Turquia. Em ambos os estudos verificou-se a durabilidade das argamassas que resistiram até ao presente sem deterioração significativa. Baronio e Binda (1997) concluíram que a durabilidade das argamassas durante séculos se deve aos componentes hidráulicos da argamassa, sendo que uma boa hidraulicidade poderia ser obtida pelo uso de pó de tijolo com propriedades pozolânicas.

Faria *et al.* (2012c) e Grilo (2013) avaliaram as propriedades de argamassas de cal aérea e de argamassas de cais hidráulicas naturais NHL3.5 e NHL5 com substituição de massa de cal por metacaulino. Da análise aos resultados concluíram que a substituição parcial de massa de cal por metacaulino levou ao aumento das resistências mecânicas em qualquer um dos três tipos de argamassas e que a humidade é essencial para que ocorra a reação pozolânica; o coeficiente de capilaridade melhora com a adição de metacaulino e o valor assintótico mantem-se; as argamassas baseadas em cais hidráulicas naturais apresentam condições de secagem semelhantes às das argamassas de cal aérea, mas o metacaulino piora ligeiramente essas condições.

Matias *et al.* (2013) e Cruz (2012) caracterizaram argamassas de cal aérea e argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 com resíduos cerâmicos provenientes de tijolos, telhas e vasos cerâmicos. Das análises realizadas constatou-se a existência de alguma reatividade pozolânica. Em termos de resistências mecânicas, as argamassas de cal NHL3.5 com baixo teor de resíduo cerâmico apresentam o melhor desempenho visto que têm resistências mecânicas bastante mais elevadas do que a argamassa de referência mas não tão elevadas quanto as argamassas com elevado teor de resíduo. Consideraram que a adoção de resíduos cerâmicos pode melhorar as características das argamassas baseadas em cal.

As cais NHL3.5 referidas nos últimos estudos apresentados [Faria *et al.*, 2012c; GRILO, 2013; MATIAS *et al.*, 2013; CRUZ, 2012] foram classificadas segundo a nova norma NP EN 459-1:2011 [IPQ, 2011]. Todos estes trabalhos se enquadram no âmbito dos projetos em que se enquadra a presente dissertação.

3. DESENVOLVIMENTO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1. Descrição geral

Com a realização deste trabalho experimental pretende-se avaliar o desempenho de argamassas de cal hidráulica natural (NHL3.5) e caracterizar o seu comportamento quando substituída uma massa parcial de cal por resíduo cerâmico (T) apenas ou por mistura de resíduo e metacaulino (T+Mk).

No caso da utilização do resíduo cerâmico pretende-se estudar o efeito filler, compactando a estrutura porosa, e o eventual efeito pozolânico. Já em relação ao metacaulino, conhecido por ser uma pozolana de elevada reatividade, pretende-se estudar o seu efeito pozolânico e quais as melhorias que implementa às argamassas de cal NHL3.5.

Para tal, foram formuladas seis composições de argamassas: partindo de um traço volumétrico 1:3, a de referência, com apenas cal e areia e as restantes com substituições de 5% ou 10% de massa de cal por resíduo cerâmico e por 5% ou 10% de resíduo cerâmico mais 5% ou 10% de metacaulino. Neste caso, o metacaulino e o resíduo cerâmico são considerados como fazendo parte do ligante. Cada uma das composições foi sujeita a três condições de cura diferentes.

A substituição de massa de cal por massa de resíduo cerâmico introduz a argamassa no conceito de sustentabilidade, uma vez que, ao reduzir o consumo de cal, é possível reduzir o consumo energético e a extração de recursos naturais para a produzir e, por outro lado, também reduzir a quantidade de resíduos com destino a aterro.

No presente capítulo são apresentados os constituintes das argamassas, a preparação de argamassas e provetes e as condições de cura a que estas foram sujeitas.

3.2. Constituintes das argamassas

As argamassas formuladas são constituídas por cal hidráulica natural NHL3.5, três tipos de areias de diferentes granulometrias, resíduo cerâmico, metacaulino e ainda água.

3.2.1. Areias

O agregado empregue nas argamassas foi uma mistura de três tipos de areias siliciosas, lavadas e calibradas com diferentes granulometrias:

- APAS 12 – Areia grossa
- APAS 20 – Areia intermédia
- APAS 30 – Areia fina

O traço volumétrico da mistura foi previamente definido para utilização repetida no âmbito dos projetos *FCT METACAL* e *LIMECONTECH*, sendo 1:1,5:1,5 de APAS 12, APAS 20 e APAS 30, respectivamente. A massa de cada areia utilizada foi a mesma para todas as composições de argamassas.

3.2.2. Cal hidráulica natural

O ligante utilizado nas misturas foi a cal hidráulica natural NHL 3.5, fabricada pela SECIL Martingança, lote de Janeiro de 2012, e classificada segundo a norma NP EN 459-1:2011 [IPQ, 2011]. Os teores dos compostos químicos presentes na cal, obtidos por análise química a uma amostra do lote de cal de Janeiro de 2012 e fornecida pela Secil, são apresentados no *Quadro 3.1*.

Quadro.3.1 – Composição química da cal hidráulica natural NHL 3.5, fornecido pela Secil

Composição química (%)						
CO ₂	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃
25,660	0,084	1,364	1,840	5,704	0,033	1,292
K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	NiO	Rb ₂ O
0,493	62,073	0,136	0,017	1,218	-	0,003
SrO ₂	Y ₂ O ₃	ZrO ₂	BaO	Cl		
0,064	0,002	0,004	-	0,016		

3.2.3. Metacaulino

Em algumas formulações de argamassas foi utilizado metacaulino (Mk) em substituição parcial de massa de cal. Neste caso o metacaulino tem proveniência francesa, é designado como Argical M-1200S e foi fornecido pela Imerys. O metacaulino é uma pozolana artificial bastante reativa e foi implementado nas argamassas de forma a melhorar as suas características.

Quadro 3.2 – Composição química do metacaulino

Composição química (%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	SO ₃
54,39	39,36	1,75	0,01	0,14	-
CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	L.O.I.
0,1	-	1,03	1,55	0,06	1,9

3.2.4. Resíduo cerâmico

O resíduo cerâmico (T), à semelhança do metacaulino, também foi empregue na formulação de diversas argamassas em substituição de uma massa parcial de cal. Este trata-se de um resíduo

de construção proveniente de desperdícios de ladrilhos cerâmicos que foram aplicados na substituição do revestimento cerâmico da fachada do Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL.

Os referidos desperdícios foram moídos e separados em diferentes gamas de granulometrias, sendo que no estudo em curso foi utilizada a granulometria mais fina.

Neste caso trata-se de um resíduo de construção; no entanto poder-se-ia facilmente utilizar resíduos resultantes de ladrilhos não-conformes da fábrica de produção destes materiais ou resíduos resultantes do seu fabrico e manuseamento.

Os constituintes secos das argamassas são apresentados na Figura 3.1.

3.2.5. Água

A água empregue nas misturas foi proveniente da rede pública de abastecimento de água. A quantidade utilizada em cada mistura foi definida antes da amassadura, após a qual foi determinada a consistência por espalhamento da argamassa, que pode ser consultada em 4.3.2, de forma a garantir uma trabalhabilidade da argamassa de acordo com o pré-definido no âmbito do projeto METACAL [FARIA, 2011].

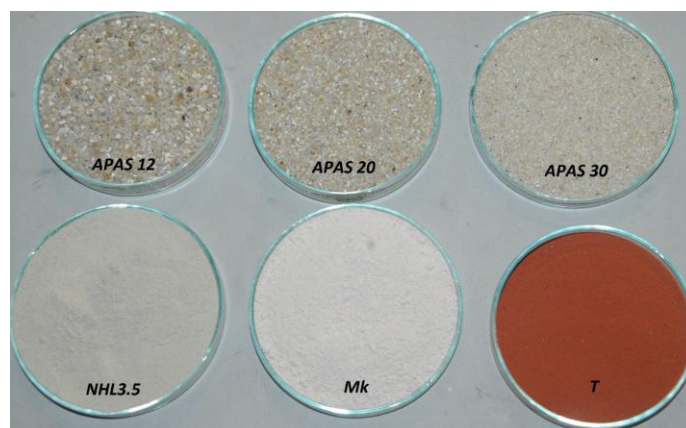


Figura 3.1 – Constituintes secos das argamassas

3.3. Preparação de argamassas e de provetes

No Quadro 3.2 são apresentadas as composições formuladas, os teores de T e Mk presentes em cada argamassa, as quantidades, em massa, de cada constituinte das argamassas e o volume de água utilizado na amassadura. A massa da mistura de areias é a mesma entre todas as composições e a massa de ligante também se mantém. Assim todas as composições têm traço ponderal 1:5. Todas as composições têm traço volumétrico 1:3, à exceção das com 10% de Mk que têm traço volumétrico 1:2.

Quadro 3.3 – Composições das argamassas

Argamassa	Substituição de massa de NHL por T [%]	Substituição de massa de NHL por Mk [%]	Massas [g]						Volume de água [ml]
			APAS 12	APAS 20	APAS 30	NHL	T	Mk	
NHL	0	0	1129,6	1686,0	1665,6	902,5	0,0	0,0	950
NHL_5T	5	0	1129,6	1686,0	1665,6	857,4	45,1	0,0	950
NHL_10T	10	0	1129,6	1686,0	1665,6	812,3	90,3	0,0	1000
NHL_5T+5Mk	5	5	1129,6	1686,0	1665,6	812,3	45,1	45,1	950
NHL_5T+10Mk	5	10	1129,6	1686,0	1665,6	767,1	45,1	90,3	950
NHL_10T+10Mk	10	10	1129,6	1686,0	1665,6	722,0	90,3	90,3	950

3.3.1. Amassadura

O processo de amassadura foi realizado numa misturadora mecânica e segundo o definido em Faria (2011).

Inicialmente, as massas dos constituintes secos de cada tipo de argamassa foram medidas em balança de precisão 0,1g e estes foram homogeneizados manualmente. As massas de cada constituinte tinham sido previamente calculadas de acordo com o traço pretendido. Como a massa total de ligante é sempre a mesma, entre as diversas composições de argamassa apenas varia a massa de cal, que é substituída por igual massa de resíduo cerâmico ou de resíduo cerâmico e meta-caulino.

Posteriormente a mistura seca foi colocada no recipiente da misturadora e acionou-se o equipamento com uma velocidade de funcionamento lenta. Durante os primeiros segundos da amassadura foi adicionada a água, medida previamente numa proveta. A primeira fase da mistura teve uma duração de 150 segundos. Depois interrompeu-se a misturadora e mexeu-se manualmente a pasta, raspando o fundo e as paredes do recipiente, com recurso a uma colher de pedreiro, de forma à mistura ficar homogénea. De seguida voltou-se a ligar a misturadora durante mais 30 segundos.



Figura 3.2 – Processo de amassadura

3.3.2. Provetes prismáticos

Foram produzidos provetes prismáticos, de dimensões 40x40x160 (mm³), em moldes metálicos, sendo que cada molde metálico permitiu produzir três provetes. Previamente à moldagem foi feita a montagem dos moldes e aplicado óleo descofrante.

Após a amassadura, a argamassa foi colocada nos moldes em duas camadas e compactada mecanicamente com 20 pancadas em cada camada. Posto isto, a superfície do molde foi rasada com auxílio de uma colher de pedreiro, retirando-se os excessos de argamassa.



Figura 3.3 – Aplicação de óleo descofrante nos moldes



Figura 3.4 – Moldagem dos provetes prismáticos de argamassa

3.3.3. Aplicação em tijolos

Foram feitos provetes de argamassa, aplicada com uma espessura de 2 cm numa face de tijolo furado de 7 cm, com área de face de 30x20 (cm²).

Para a aplicação de argamassa no tijolo, este foi colocado no interior de um molde que o envolve até 2 cm acima da sua face superior, e foi aspergido com água. Sobre o molde foi colocado um dispositivo, com 70 cm de altura e restantes dimensões iguais às do molde, do topo do qual foi deixada cair a argamassa para o tijolo. Esta técnica teve o objetivo de simular a energia de projeção da argamassa, por parte operário, no suporte, garantindo uma energia de projeção sempre similar.

Após a argamassa ter sido deixada cair sobre o tijolo, o dispositivo foi retirado e a argamassa rasada à face do molde, produzindo um provete de tijolo com revestimento de 2 cm.

3.4. Condições de cura

Os provetes prismáticos de cada argamassa foram curados em diferentes ambientes, durante 28 dias e 90 dias, com o objetivo de avaliar e comparar os comportamentos das mesmas composições entre as diferentes curas. As três condições de cura foram: cura húmida (H), cura com aspersão inicial de água (SP) e cura standard (St). Os provetes de argamassa aplicada no tijolo foram sujeitos às condições da cura com aspersão inicial de água.



Figura 3.5 – Aplicação de argamassa no tijolo e provete de argamassa em tijolo

As curas decorreram em laboratório, à temperatura de $20\pm 3^{\circ}\text{C}$.

A desmoldagem dos provetes foi efetuada aos dois dias de idade.

3.4.1. Cura Húmida

Nas condições de cura húmida (H) os provetes, logo após a moldagem, foram envoltos em polietileno de modo a manter a humidade relativa elevada e evitar uma desidratação rápida das argamassas. Apesar da desmoldagem aos dois dias de idade das argamassas, os provetes permaneceram envoltos em polietileno até ao 5º dia, após o qual foram colocados numa câmara húmida com humidade relativa (HR) de $90\pm 5\%$.

Na referida câmara existe um grande reservatório com água, sobre o qual estão colocadas umas grelhas metálicas que servem de suporte aos provetes expostos a este ambiente. Sobre os provetes está colocada uma tampa em filme de polietileno, de forma a manter a humidade relativa elevada.

Os provetes, tanto os ensaiados aos 28 dias, quanto os ensaiados aos 90 dias, foram retirados destas condições com 24h de antecedência ao primeiro ensaio realizado às argamassas em estado endurecido e colocados a condições de HR de $65\pm 5\%$.

3.4.2. Cura com aspersão inicial de água

Os provetes sujeitos a cura com aspersão inicial de água (SP) foram colocados em sala condicionada, às condições de HR de $65\pm 5\%$, logo após a moldagem. Inicialmente ainda dentro do mol-

de, foram aspergidos com água desde 2º até ao 5º dia após a produção das argamassas, não sendo mais aspergidos durante o restante tempo de cura.

A cura descrita, exceção feita à manutenção de condições estáveis de HR e temperatura, é facilmente reproduzível em obra.

3.4.3. Cura standard

A cura designada por standard (St) decorre segundo o preconizado na norma europeia EN 1015-11:1999 [CEN, 1999a].

Os provetes, à semelhança do que acontece na cura húmida, são também envoltos em polietileno durante os primeiros cinco dias de idade das argamassas, após os quais são colocados em condições de HR de $65\pm 5\%$. Diferem da cura H apenas pelas condições de HR, enquanto da cura SP diferem por terem estado envoltos os 5 dias iniciais em polietileno e não terem tido aspersão com água diária do 2º ao 5º dia.

4. ENSAIOS E RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO

4.1. Descrição geral

As argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5, produzidas em Portugal e segundo os critérios estabelecidos na nova norma NP EN 459-1:2011, têm sido alvo de caracterização [GRILO, 2013]. Também a adoção de metacaulino ou resíduo cerâmico em argamassas baseadas na referida cal já foi estudada recentemente [GRILO, 2013; CRUZ, 2012]; no entanto não foram estudadas argamassas com ambos os constituintes em simultâneo e o resíduo cerâmico utilizado não foi o mesmo. Além disso, nos vários estudos que têm sido realizados a argamassas, sejam elas com base em cal aérea ou em cal hidráulica natural, com metacaulino ou resíduo cerâmico em substituição de ligante ou agregado, os teores de substituição são diferentes. Assim, o que se pretende também com o presente estudo é a otimização dos teores a adotar, que conduza a uma otimização da argamassa, neste caso com o fim de aplicação maioritária na substituição ou reparação de rebocos em alvenarias existentes, especialmente as mais antigas.

As argamassas foram avaliadas no estado fresco e no estado endurecido. A campanha foi particularmente longa em relação aos ensaios no estado endurecido, tendo sido realizados ensaios de cariz mecânico, físico, químico e microestrutural. Para uma melhor caracterização das argamassas foram ainda analisados os seus constituintes.

A apresentação de cada ensaio realizado é iniciada por uma breve descrição do mesmo, seguida do seu procedimento de execução, método de tratamento de resultados e finalmente apresentação e análise dos resultados obtidos. Em alguns casos são ainda acrescentadas observações referentes a situações verificadas no decorrer dos ensaios.

4.2. Ensaios aos constituintes secos

4.2.1. *Análise granulométrica*

A análise granulométrica consiste na distribuição de uma amostra em diferentes gamas de dimensões de partículas, constituintes desse material, e conseqüentemente na determinação da percentagem mássica que cada gama possui em relação à massa total da amostra.

Existem diversos métodos para avaliação granulométrica, tais como:

- Peneiração – aplicada em materiais granulares, tais como as areias;
- Sedimentação – aplicada em materiais finos, tais como as argilas;
- Difração laser – aplicada em materiais finos

No presente trabalho experimental foram analisadas, pelo método da peneiração, as granulometrias dos três tipos de areias, da mistura das areias e do resíduo cerâmico, sendo que este último componente foi ainda analisado por difração laser.

4.2.1.1 Análise granulométrica por peneiração

Descrição

No método da peneiração, a amostra é feita passar por uma torre de peneiros, com malhas de diversas dimensões de abertura, colocadas por ordem decrescente de dimensão. Analisando as massas de amostra que ficam retidas em cada um dos peneiros é possível distinguir as diversas gamas de dimensões das partículas e também a percentagem dessas gamas, face à massa total da amostra. Após a análise é possível traçar a curva granulométrica, que é a representação gráfica das percentagens acumuladas de massa que passa em cada peneiro.

No caso das areias e da mistura de areias a análise granulométrica foi realizada no LNEC, no âmbito dos projetos *METACAL* e *LIMECONTECH* e segundo a norma NP EN 933-1:2000 [IPQ,2000]. A amostra de resíduo cerâmico foi analisada no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL. O resíduo foi proveniente da britagem de ladrilhos cerâmicos, tendo sido separado em várias gamas de granulometrias e utilizado na simulação de meios porosos para injeção de grout no âmbito de uma tese de doutoramento em curso. A granulometria mais fina foi adotada para o presente trabalho experimental e a análise granulométrica foi executada com recurso aos peneiros ASTM (American Society of Testing Materials) das séries principal e secundária, desde o peneiro nº100, com abertura de 0,15mm, até ao refugo.

Procedimento de ensaio

Antes da peneiração, separou-se uma porção significativa da granulometria mais fina do material, da qual foi retirada uma amostra de cerca de 1kg que foi posteriormente colocada em estufa a $60\pm 5^{\circ}\text{C}$, até ficar com massa constante. Na execução do ensaio, a amostra passou numa torre de peneiros (a partir do nº100) sobre ação de um agitador mecânico. Após o término da agitação, retiraram-se os peneiros desde a malha de maior dimensão e foram-se registando as massas de amostra que ficaram retidas em cada um.

Tratamento de resultados

Após a medição das massas retidas em cada peneiro foram calculadas as percentagens de material retido e de material passado acumulado em cada peneiro. A curva granulométrica, definida a partir da análise granulométrica, é apresentada num gráfico onde nas abcissas são representados, numa escala logarítmica, os diâmetros das partículas e nas ordenadas são representadas as percentagens de material passado acumulado.

Apresentação e análise de resultados

Na *Figura 4.1* são apresentadas as curvas granulométricas dos três tipos de areias (APAS 12, APAS 20 e APAS 30), da mistura de areias e ainda do resíduo cerâmico (T). Pela análise das curvas, de modo geral, é possível perceber que as partículas de resíduo cerâmico têm, como seria de esperar, uma dimensão bastante inferior às das areias, variando entre 0,05 a 0,2 mm.

As curvas granulométricas de cada tipo de areia e do resíduo cerâmico são uniformes. Tal é visível pelas curvas serem praticamente verticais. No entanto, seria espectável este comportamento da parte das areias, uma vez que as areias utilizadas vêm calibradas de fábrica e com granulometrias definidas. No caso do resíduo cerâmico o comportamento também era espectável uma vez que apenas foi utilizada a granulometria mais fina do resíduo. No caso da mistura de areias, como se trata da mistura de areias de três granulometrias diferentes, verifica-se uma granulometria mais extensa, tal como se pretendia com a mistura, com maior variação de dimensões.

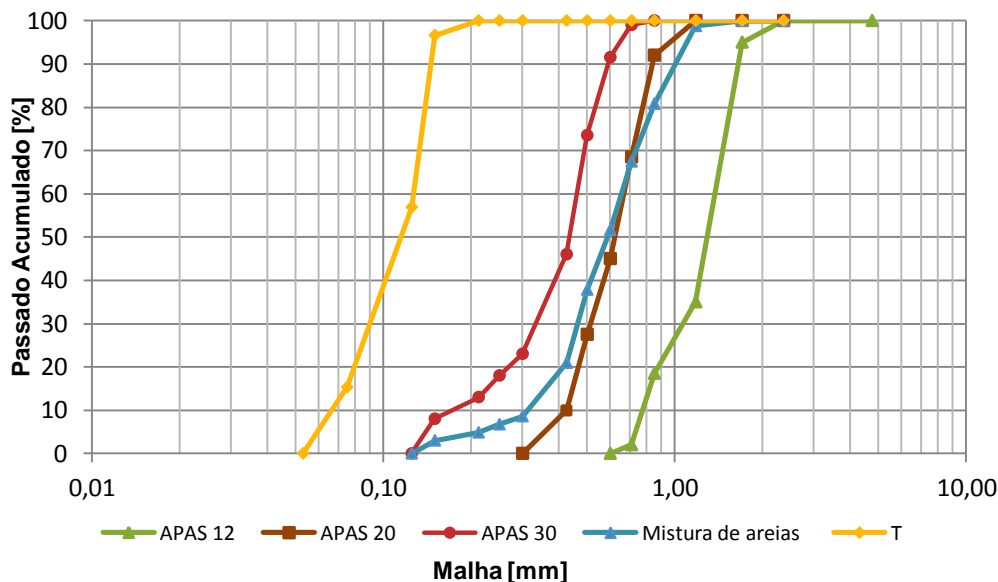


Figura 4.1 – Curvas granulométricas das areias e do resíduo cerâmico

4.2.1.2 *Análise granulométrica por difração laser*

Descrição

A análise granulométrica por difração laser, realizada a uma amostra de resíduo cerâmico, foi efetuada no ITeCons, Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção, pela Eng.^a Gina Matias e com recurso a um equipamento Mastersizer 2000 Ver.5.60, da Malvern Instruments, no âmbito do projeto EXPL/ECM-COM/0928/2012.

A técnica de difração a laser aplicada à análise granulométrica permite conhecer a distribuição do tamanho de partículas da amostra. O funcionamento do aparelho baseia-se na emissão de

dois raios laser, com ângulos de incidência diferentes, que colidem com as partículas da amostra, sofrendo desvios que incidem num conjunto de placas detetoras. O ângulo de luz refratada é inversamente proporcional ao diâmetro da partícula, pelo que quanto menor a dimensão das partículas, maiores são os desvios de raios laser. De tal análise e através do software associado ao aparelho é obtido um gráfico semi-logaritmico onde é representado o volume de partículas que compõem a amostra em função dos seus diâmetros.

Apresentação e análise de resultados

Na *Figura 4.2* são apresentadas três distribuições do tamanho das partículas de resíduo cerâmico. Foram realizados três ensaios ao resíduo para verificar a tendência média em relação à dimensão das partículas. Em todos é evidente que os diâmetros das partículas estão no intervalo de valores entre 0,4 μ m e 700 μ m. No ensaio, de todas as amostras, verifica-se um maior volume de partículas com dimensões num intervalo entre 20 μ m e 600 μ m, verificando-se especialmente picos de diâmetros nos 70 μ m e entre 400 μ m a 500 μ m. Considera-se que partículas com diâmetro inferior a 75 μ m poderão apresentar alguma pozolanicidade [FARIA-RODRIGUES, 2004; TEUTONICO, 1994]. Dado que se verifica um volume substancial de partículas com diâmetro inferior, poderá presumir-se que o resíduo tenha algum potencial pozolânico.

Comparativamente à análise granulométrica por peneiração, que apresenta, para o resíduo, um intervalo de valores de 0,05mm a 0,2mm (50 μ m a 200 μ m) verifica-se, como expectável, que o método de peneiração não permite caracterizar a granulometria no caso das partículas com menores dimensões; daí as diferenças entre os menores valores de diâmetro obtidos por ambos os métodos. Em relação à maior dimensão das partículas, no método de peneiração a totalidade da amostra passa no peneiro com malha de 0,212mm (212 μ m). Assim o facto do método da difração apresentar partículas com dimensão superior a 200 μ m poderá dever-se à forma das partículas, isto é, as partículas em vez de terem um formato esférico poderão ter um formato cilíndrico ou achatado, com uma dimensão superior numa direção, e assim os raios laser incidirem na maior dimensão das partículas, apresentando granulometrias maiores.

4.2.2. Baridade

Descrição

A baridade é a massa de um material granular por unidade do seu volume aparente. Esta grandeza permite relacionar o traço volumétrico dos constituintes da argamassa com o seu traço ponderal, permitindo calcular a massa necessária de cada constituinte da argamassa para o traço volumétrico que se pretenda obter.

Foi determinada a baridade de todos os constituintes sólidos empregues nas argamassas formuladas. A sua determinação baseou-se no preconizado na norma NP EN 1097-3:2002 [IPQ, 2002].

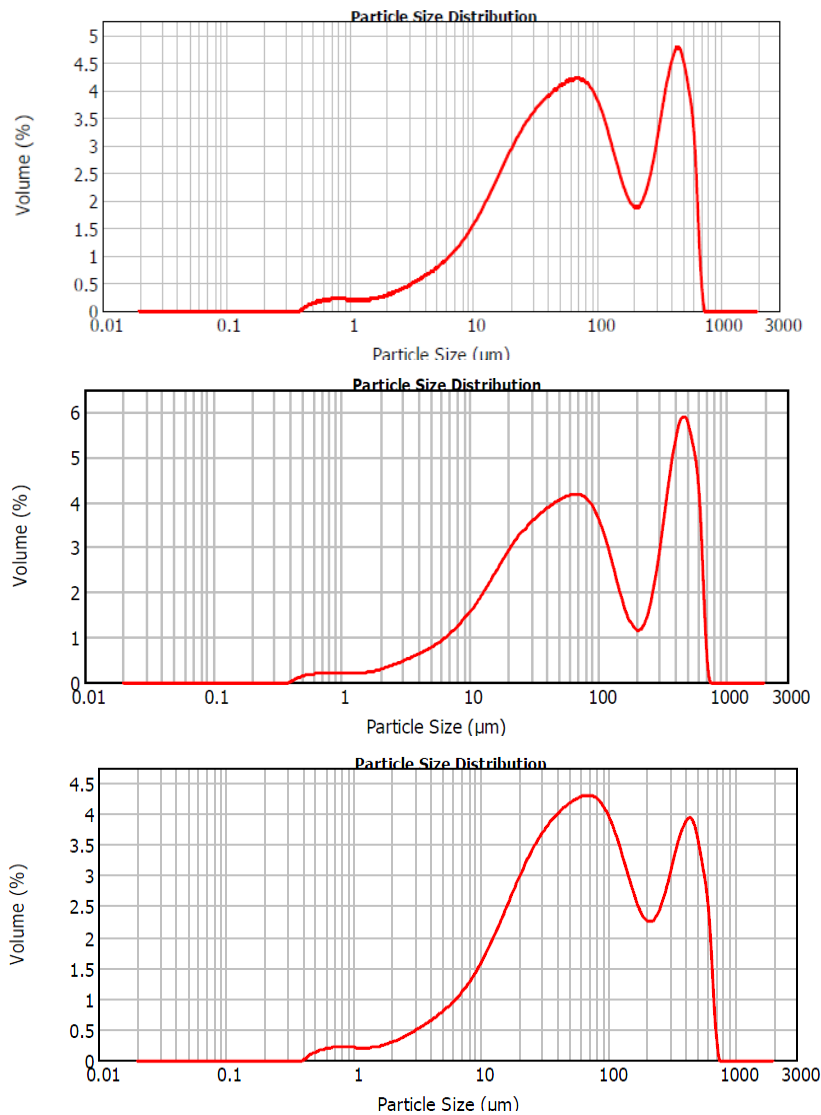


Figura 4.2 – Distribuição do tamanho das partículas de três amostras de resíduo cerâmico analisado por difração a laser

Procedimento de ensaio

A amostra do material granular foi primeiramente colocada em estufa até massa constante. Na realização do ensaio, o material foi inicialmente colocado num funil cônico, com o orifício inferior inicialmente obstruído, e depois deixado cair do funil para o interior de um copo metálico, com massa previamente medida e volume conhecido (749cm³), até ficar completamente preenchido. Depois, rasou-se cuidadosamente (para evitar compactar a amostra) a superfície do recipiente e mediu-se a massa do copo metálico com o material.

Tratamento de resultados

A baridade de cada constituinte foi calculada através do quociente entre o valor médio das três massas obtidas e o volume do recipiente.



Figura 4.3 – Ensaio de baridade

Apresentação e análise de resultados

Os resultados obtidos no ensaio de baridade são apresentados no *Quadro 4.1* para todos os constituintes das argamassas. Como seria espectável as areias apresentam os valores mais elevados de baridade, isto é, 1 cm³ de areia apresenta uma massa bastante superior ao mesmo volume de qualquer um dos ligantes utilizados. Verifica-se também que quanto maior a granulometria das areias, maior a sua baridade. A mistura de areias apresenta um valor superior ao de qualquer uma das areias separadamente; tal acontece devido ao arranjo das partículas com diferentes dimensões, formando uma estrutura mais compacta e, conseqüentemente, com menor índice de vazios. O metacaulino apresenta o valor de baridade mais baixo, sendo bastante inferior mesmo quando comparado com a cal ou o resíduo cerâmico.

Quadro 4.1 – Baridade dos constituintes das argamassas

Materiais	Baridade (g/cm ³)
APAS12	1,412
APAS20	1,405
APAS30	1,388
Mistura de areias	1,463
T	1,058
Mk	0,294
NHL3.5	0,771

4.2.3. Superfície específica

Descrição

As superfícies específicas da cal hidráulica natural NHL 3.5 e do metacaulino M1200S foram analisadas por *Patrício* (2013) através do método BET, também designado de NSA (*Nitrogen Surface Area*), que permite medir a superfície específica total (interna e externa) por absorção de azoto a -196°C. O azoto nestas condições forma uma camada macromolecular de gás sobre a superfície das partículas e conhecendo o número total de moléculas absorvidas é possível calcular a superfície específica.

Apresentação e análise de resultados

No Quadro 4.2 são apresentados os resultados de superfície específica obtidos por Patrício (2013).

Quadro 4.2 – Superfície específica

Materiais	Superfície específica (m ² /g)
Mk	23,1081
NHL3.5	5,9818

O metacaulino apresenta uma elevada superfície específica. Sabendo que a superfície específica é um dos fatores que tem forte influência na reatividade pozolânica do material e que quanto mais elevada a superfície específica do material, mais reativo este será, conclui-se, por esta análise, que à partida o metacaulino será bastante reativo. Em relação à superfície específica da cal hidráulica natural NHL 3.5, verifica-se que é bastante mais baixa do que a do metacaulino, mas ainda assim bastante superior à fornecida pela Secil na ficha técnica da cal (já realizada segundo a norma EN 459-1:2010 [CEN, 2010]) de 0,9 m²/g, embora avaliada pelo método de Blaine.

4.2.4. Difração de Raios X

Descrição

A difração de raios X (DRX) consiste numa análise mineralógica que permite identificar as fases cristalinas presentes nos compostos numa amostra de um dado material sólido. O ensaio foi realizado no LNEC, com recurso a um difratómetro PW3710 da Philips, a operar a 35kV e a 45mA e com uma radiação com comprimento de onda $\lambda=1,7903\text{Å}$ [GAMEIRO *et al.*, 2012].

O funcionamento do difratómetro baseia-se na emissão de radiações monocromáticas que incidem na amostra, produzindo uma interferência construtiva de raios X em análise e difratam com a mesma energia com que incidiram, quando são satisfeitas as condições da Lei de Bragg (apresentada na Equação 4.1). Esta lei relaciona o comprimento de onda da radiação (λ) com o ângulo de difração (θ) e o espaçamento (d) da rede de uma estrutura cristalina, onde os átomos estão regularmente espaçados. A radiação difratada é detetada e processada, sendo produzido um difratograma. A amostra é varrida numa série de ângulos 2θ , de forma a obter todas as possíveis direções de difração da rede. A partir da análise dos espaçamentos d é possível identificar, com a ajuda de bibliotecas de espetros de difração de minerais puros, os minerais que compõem o material.

$$2d \times (\sin\theta) = n \times \lambda$$

Equação 4.1

A análise é sobretudo qualitativa, focando-se mais na identificação dos compostos em fase cristalina e não na sua quantificação exata. No entanto, por comparação da intensidade dos picos do difratograma é possível saber, em termos de proporção, quais os compostos presentes em maior

quantidade e, se forem comparadas duas ou mais amostras, é possível verificar qual a amostra que terá mais ou menos quantidade de um determinado composto.

O ensaio de DRX foi realizado a amostras de cal NHL3.5, Mk e T.

Procedimento

A amostra foi previamente seca em estufa à temperatura de 40°C e de seguida passada num peneiro com malha com abertura de 106µm. Posteriormente foi colocada no porta-amostras, por compactação do material em camadas finas. O porta-amostras foi introduzido no difratómetro e o ensaio iniciado.



Figura 4.4 – Enchimento do porta-amostras



Figura 4.5 – Difratómetro de Raios X

Tratamento de resultados

Do ensaio obtêm-se difratogramas e é através da análise dos picos mais intensos que são identificadas as fases cristalinas presentes na amostra. Cada fase cristalina é associada a pelo menos dois picos característicos, pelo que para se identificar um determinado mineral na amostra é essencial que existam pelo menos dois picos nas posições correspondentes aos picos característicos.

Foram analisados os difratogramas de cada uma das amostras com recurso ao software, associado ao difratómetro, e num intervalo de 10° a 60° 2θ. O software identifica os possíveis compostos associados ao material e ainda identifica todas as posições de picos de um mesmo composto, possibilitando assim associar os compostos aos picos obtidos.

Apresentação e análise de resultados

Nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 estão representados os difratogramas da cal, do metacaulino e do resíduo cerâmico, respectivamente.

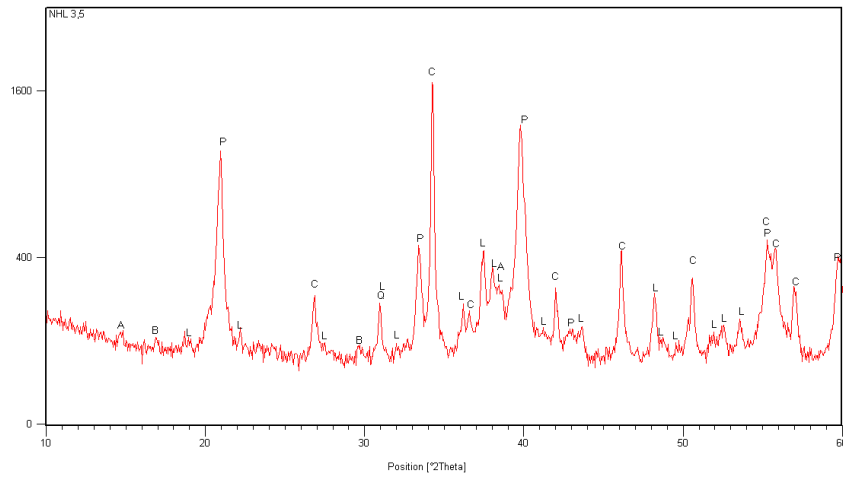


Figura 4.6 – Difratograma da cal NHL3.5

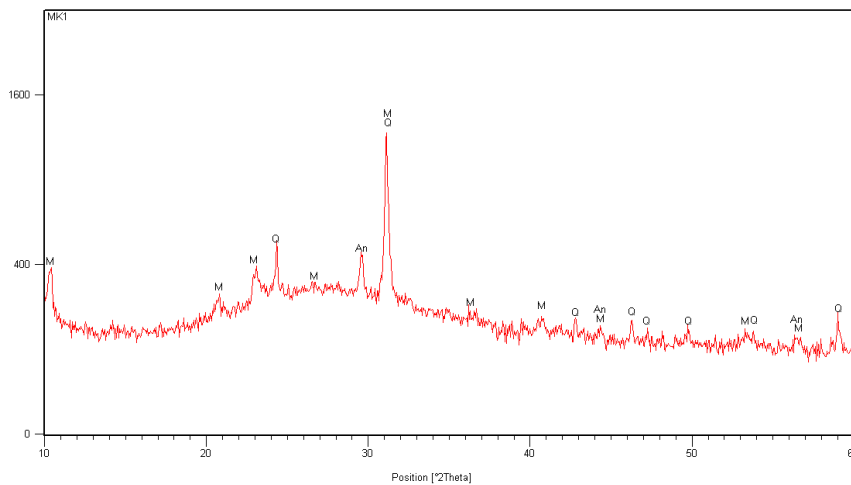


Figura 4.7 – Difratograma do metacaulino

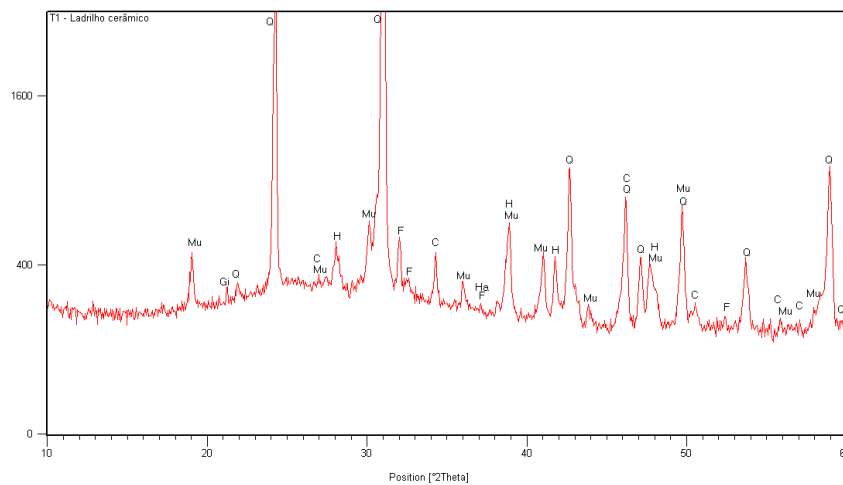


Figura 4.8 – Difratograma do resíduo cerâmico

No *Quadro 4.3* são apresentados os compostos identificados nas argamassas e a avaliação qualitativa da sua proporção.

Quadro 4.3 – Compostos cristalinos identificados nas matérias-primas

<i>Compostos identificados</i>	<i>Composição química</i>	<i>NHL 3.5</i>	<i>Mk</i>	<i>T</i>
Portlandite (P)	Hidróxido de cálcio (Ca(OH) ₂)	++/+++	-	-
Calcite (C)	Carbonato de cálcio (CaCO ₃)	++/+++	-	vtg
Larnite (L)	Belite (silicato bicálcico – 2CaO.SiO ₂)	+ / ++	-	-
Bassanite (B)	Sulfato de cálcio hemihidratado (CaSO ₄ .½H ₂ O)	vtg	-	-
Quartzo (Q)	Sílica (SiO ₂)	vtg	++	+++
Aluminato de cálcio (A)	Celite (aluminato tricálcico 3CaO.Al ₂ O ₃)	vtg	-	-
Mulite (Mu)	3Al ₂ O ₃ .2SiO ₂	-	-	+ / ++
Hematite (H)	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	-	-	+
Feldspato potássico (F)	KAlSi ₃ O ₈	-	-	vtg
Halite (Ha)	Cloreto de sódio (NaCl)	-	-	vtg/?
Gibbsite (Gi)	Hidróxido de alumínio (Al(OH) ₃)	-	-	vtg/?
Mica (M)	Moscovite (KAlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂)	-	+	-
Anátase (An)	Dióxido de titânio (TiO ₂)	-	vtg/+	-

Notação: +++ (proporção elevada); ++ (proporção média); + (proporção fraca); vtg (vestígios); - (não detetado); ? (duvidas na existência)

Na NHL 3.5, os compostos em maior proporção são a portlandite, a calcite e a larnite. Já no Mk e no T é o quartzo a fase cristalina presente em maior proporção. A reatividade pozolânica dos materiais deve-se, entre outros fatores, à quantidade de compostos no estado amorfo que os constitui. No presente ensaio não é possível identificar esses compostos amorfos (só os cristalinos); no entanto a sua existência pode ser identificada nos difratogramas do T e do Mk pela existência de uma banda no intervalo entre cerca de 20° e 40° 2θ. Essa banda é mais evidente no difratograma do Mk, sendo que este material apresenta também muito menos compostos cristalinos que o difratograma do T, pelo que se conclui que a reatividade do Mk é superior.

4.2.5. Análise termogravimétrica

Descrição

A análise termogravimétrica (ATG) consiste na medição constante da massa de uma amostra à medida que esta é sujeita a um aumento controlado da temperatura (desde a temperatura ambiente até cerca de 1000°C). Durante o aquecimento vão ocorrendo perdas de massa associadas à desidratação de compostos hidratados ou à descarbonatação de carbonatos presentes no material em análise. Conhecendo os intervalos de temperatura em que se dá a desidratação da portlandite (aproxima-

damente entre 400 a 500°C) e a descarbonatação da calcite (aproximadamente entre 500 a 850°C) é possível calcular os teores de portlandite e de calcite presentes nas amostras.

Foram realizadas análises a amostras de NHL3.5, Mk e T. Os ensaios decorreram no Departamento de Materiais do LNEC e com recurso ao equipamento SETARAM TGA 92.

Procedimento

As amostras foram passadas pelo peneiro de 106µm. Antes do início do ensaio, uma pequena massa da amostra foi colocada num pequeno recipiente metálico que foi, de seguida, inserido na termobalança do equipamento.

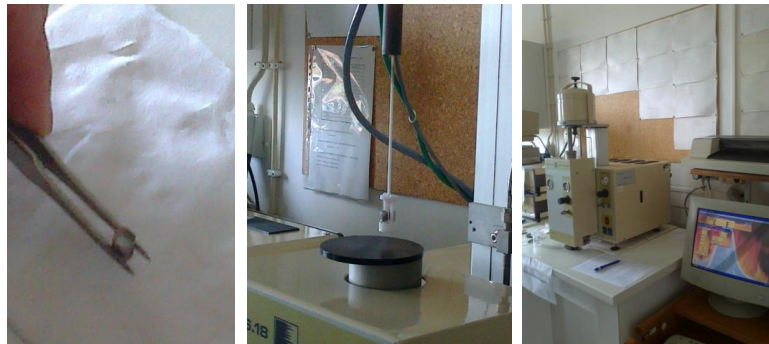


Figura 4.9 – Análise termogravimétrica

Tratamento de resultados

O software do SETARAM TGA 92 apresenta as curvas TG, curvas que relacionam as perdas de massa em função do aumento da temperatura e as suas derivadas, dTG, que permitem identificar mais facilmente quando se iniciam e terminam as perdas de massa, especialmente importantes quando as perdas associadas à desidratação da portlandite ou à descarbonatação da calcite são pequenas. Na apresentação de resultados serão apenas apresentadas as curvas dTG.

O teor de portlandite presente na amostra é calculado por aplicação da *Equação 4.2* e o teor de calcite pela *Equação 4.3*.

$$\text{Teor } [Ca(OH)_2] \text{ livre}(\%) = v. m._{400-500^\circ C} \times \frac{M_{Ca(OH)_2}}{M_{H_2O}}$$

Equação 4.2

Em que,

$v. m._{400-500^\circ C}$ – Variação de massa na gama de temperaturas entre 400 e 500°C

$M_{Ca(OH)_2}$ – Massa molar do $Ca(OH)_2$ ($M_{Ca(OH)_2} = 74g/mol$)

M_{H_2O} – Massa molar do H_2O ($M_{H_2O} = 18g/mol$)

$$\text{Teor } [CaCO_3](\%) = v.m._{500-850^\circ C} \times \frac{M_{CaCO_3}}{M_{CO_2}}$$

Equação 4.3

Em que,

$v.m._{500-850^\circ C}$ – Variação de massa na gama de temperaturas entre 500 e 850°C

M_{CaCO_3} – Massa molar do $CaCO_3$ ($M_{CaCO_3} = 100g/mol$)

M_{CO_2} – Massa molar do CO_2 ($M_{CO_2} = 44g/mol$)

Apresentação e análise de resultados

As curvas dTG da cal, do metacaulino e do resíduo cerâmico são apresentadas na *Figura 4.10*. Da sua análise é facilmente perceptível que o metacaulino não têm nem portlandite nem calcite, pois não regista nenhuma perda de massa nos intervalos onde são verificadas a desidratação da portlandite e a descarbonatação da calcite. No caso do resíduo cerâmico existe apenas calcite mas a sua quantidade é mínima, quando comparada com o teor presente na cal. Na cal existem elevados teores de portlandite e de calcite, como seria expectável. Verifica-se que o intervalo de perda de massa associado à portlandite é ligeiramente mais alargado do que o previsto inicialmente (aproximadamente de 380 a 550°C) e o da calcite ligeiramente deslocado face às temperaturas inicialmente previstas (aproximadamente de 550 a 900°C). Estas diferenças estão relacionadas com os teores daqueles compostos.

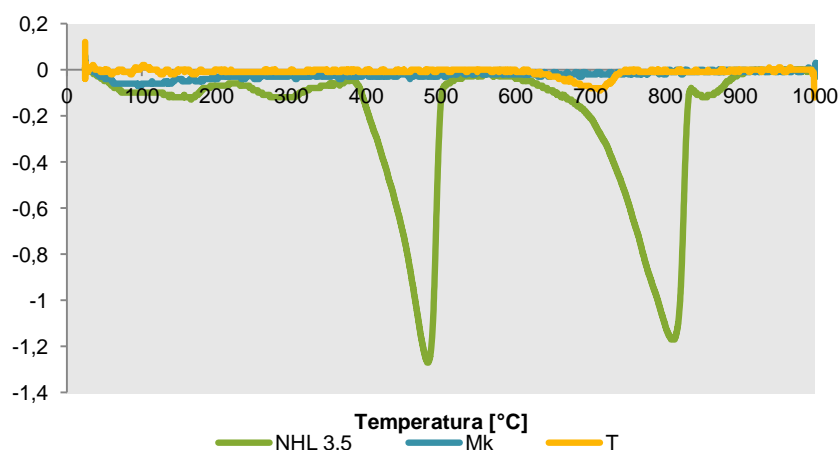


Figura 4.10 – Curvas dTG da cal, do metacaulino e do resíduo cerâmico

As perdas de massa e teores de portlandite e calcite são apresentados no *Quadro 4.4*.

Quadro 4.4 – Teores de portlandite e calcite

Amostra	V.M. _{380-550°C} (%)	Teor de Portlandite (%)	V.M. _{550-900°C} (%)	Teor de calcite (%)
NHL 3.5	7,19	29,6	10,70	24,3
Mk	0	0	0	0
T	0	0	0,63	1,43

4.2.6. Avaliação da reatividade pozolânica – Ensaio modificado de Chapelle

Descrição

O ensaio modificado de Chapelle foi realizado no Departamento de Materiais do LNEC e segundo o procedimento descrito na norma francesa NF P 18-513:2010 [AFNOR, 2010] definida para avaliação da reatividade pozolânica de metacaulinos. No presente trabalho os resultados apresentados são referentes à avaliação da reatividade pozolânica do metacaulino e do resíduo cerâmico; no entanto apenas o ensaio com resíduo cerâmico foi realizado pela autora.

O ensaio de Chapelle trata-se de um ensaio químico em que são tituladas soluções de óxido de cálcio com uma pozolana, com HCl a 0,1M. O volume de HCl gasto nas titulações permite calcular a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fixado na reação entre o óxido de cálcio e a pozolana e assim avaliar o potencial pozolânico da amostra em análise.

Procedimento

Inicialmente foi preparado o óxido de cálcio (CaO) por calcinação, a 1000°C , de uma massa de 3,6g de carbonato de cálcio (CaCO_3). Posteriormente num copo de aço inoxidável colocou-se 1g da amostra do resíduo, 2g do CaO, um agitador magnético e 250ml de água sem dióxido de carbono. O copo, devidamente tamponado e com coluna de refrigeração e o termómetro inseridos nas aberturas da tampa, foi colocado sobre a placa de aquecimento a cerca de 90°C com a agitação magnética acionada. Após a estabilização do termómetro a uma temperatura de cerca de $85\pm 5^\circ\text{C}$, manteve-se aquecimento e a agitação magnética da solução ligados durante as 16h seguintes.

Passado esse tempo e após a solução arrefecida, foi-lhe adicionada uma solução de sacarose e agitada a solução por mais 15 minutos. Posteriormente a solução foi filtrada por vácuo e inserida em porções de 25ml em Erlenmeyers com 3 gotas de fenolftaleína. Para finalizar o ensaio fizeram-se as titulações com ácido clorídrico (HCl a 0,1M) e anotou-se o volume de HCl gasto até a solução ficar transparente, isto é, com pH neutro. O processo foi repetido mas sem adicionar qualquer amostra – ensaio branco.



Figura 4.11 – Ensaio de chapelle

Observações

Foram realizados no total três ensaios em branco e os resultados obtidos foram semelhantes. No entanto, no que respeita ao ensaio com resíduo cerâmico foram realizados cinco ensaios e os resultados foram bastante dispersos. Primeiramente apontou-se o facto do hidróxido de cálcio não se dissolver totalmente na solução, e serem observáveis partículas desse produto em suspensão após as 16h de ensaio, como possível causa para as diferenças encontradas. Colocou-se a hipótese do agitador magnético não ser eficiente quando o termómetro estava na solução durante o ensaio, uma vez que a bainha metálica do termómetro poderia atrair o agitador magnético. Posteriormente pôs-se em causa o efeito da temperatura na solução e o facto de não ser possível monitorizar as variações de temperatura da solução durante as 16h em que a solução está sobre a placa de aquecimento. No entanto, na *Figura 4.12* é possível reparar na diferença de cor de diferentes soluções com resíduo cerâmico após as 16h de aquecimento. Visto que as quantidades de resíduo, óxido de cálcio e água inseridos na solução são iguais, as diferenças nas cores das soluções e posteriormente nos resultados poderão estar relacionadas com a falta de homogeneização do resíduo, logo quando é retirado para a solução, podendo possivelmente as amostras utilizadas conterem diferentes teores de hematite, mesmo apesar de sua proveniência ser sempre do mesmo resíduo que está adequadamente acondicionado e homogeneizado. Uma hipótese que se pode também colocar será alguma eventual alteração que o material cerâmico cozido possa sofrer, por exemplo devido a diferente exposição que possa ter tido.

Devido à morosidade da realização do ensaio, optou-se por não realizar mais ensaios, pelo que são aqui apresentados os resultados obtidos e as dificuldades encontradas na sua realização.



Figura 4.12 – Diferenças de cor das várias soluções

Tratamento de resultados

No caso da solução em branco, é necessária a validação do ensaio. Para tal tem de se garantir a condição apresentada na *Equação 4.4*, em que V_1 é o volume médio de $\text{HCl}_{0,1\text{M}}$ gasto nas titulações de 25ml de solução do branco. V_1 é multiplicado a um fator de correção da solução de HCl a 0,1 M – $f_c(\text{HCl}_{0,1\text{M}}) = 1,03334$.

$$\frac{56}{2} \times V_1 < 1000$$

Equação 4.4

Em relação à solução com amostra, o conhecimento da reatividade pozolânica passa pelo cálculo da quantidade de Ca(OH)_2 fixado. Quanto maior for essa quantidade, mais reativa será a amostra. O cálculo é feito pela aplicação da *Equação 4.5*, em que V_2 é o volume médio de $\text{HCl}_{0,1\text{M}}$ gasto nas titulações de 25ml de solução com resíduo cerâmico, devidamente sujeito ao fator de correção da solução $\text{HCl}_{0,1\text{M}}$.

$$mg \text{ de } \text{Ca(OH)}_2 \text{ fixado} = 2 \times \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times \frac{74}{56} \times 1000$$

Equação 4.5

Apresentação e análise de resultados

No *Quadro 4.5* são apresentados os volumes de HCl gastos nas titulações dos ensaios em branco e com resíduo cerâmico. É possível observar que os desvios entre as três titulações realizadas em cada ensaio são baixas; no entanto, no caso dos ensaios com resíduo, o volume gasto entre cada ensaio varia bastante, produzindo posteriormente valores de Ca(OH)_2 bastante dispersos também.

Quadro 4.5 – Volume médio de HCl gasto na titulação das soluções em branco e com amostra

	Ensaio	Ensaio em branco	Ensaio com resíduo
1	Média (ml)	31,85	27,93
	D.P.	0,00	0,06
2	Média (ml)	31,73	28,80
	D.P.	0,06	0,17
3	Média (ml)	31,43	29,17
	D.P.	0,06	0,15
4	Média (ml)	-	29,67
	D.P.	-	0,06
5	Média (ml)	-	27,88
	D.P.	-	0,03
Volume médio gasto de todos os ensaios (ml)		31,67	28,69
D.P.		0,21	0,78

Quadro 4.6 – Quantidade de Ca(OH)_2 fixado (mg)

Ensaio	Quantidade de Ca(OH)_2 fixado (mg)	
	Mk	T
1	1493	325
2	1403	253
3	1290	214
4	1242	172
5	1281	298

No *Quadro 4.6* são apresentadas as quantidades de Ca(OH)_2 fixado (mg) pelo metacaulino, resultados dos ensaios realizados no LNEC no âmbito do projeto METACAL, e para o resíduo cerâmico. Apesar da dispersão de valores, que não se encontram dentro dos 10% de dispersão admitidos pela norma NF P 18-513:2010 [AFNOR, 2010], é possível constatar e concluir que o resíduo cerâmico tem um reduzido potencial pozolânico, como era aliás expectável.

4.3. Ensaio às argamassas no estado fresco

4.3.1. Análise dos traços e composições

No quadro 4.7 são apresentados o traço volumétrico e o traço ponderal, a relação água/ligante e a consistência por espalhamento das várias composições. No que respeita ao traço ponderal é apresentada a relação de massas ligante-areias, assumindo T e Mk como ligantes, e a relação detalhada entre a massa de cal e as massas de cada um dos restantes constituintes das argamassas.

Quadro 4.7 – Traço volumétrico, traços ponderais, relação água/ligante e espalhamento

Argamassa	Traço volumétrico	Traço Ponderal		Relação A/(NHL+T+Mk)	Esp. (mm)
	[L+Mk+T:Areia]	[NHL+T+Mk:Areia]	[NHL:T:Mk:APAS12:APAS20:APAS30]		
NHL	1:3	1:5	1:0:0:1,3:1,9:1,8	1,05	166,0
NHL_5T	1:3	1:5	1:0,1:0:1,3:2,0:1,9	1,05	158,5
NHL_10T	1:3	1:5	1:0,1:0:1,4:2,1:2,1	1,11	181,8
NHL_5T+5Mk	1:3	1:5	1:0,1:0,1:1,4:2,1:2,1	1,05	154,0
NHL_5T+10Mk	1:2	1:5	1:0,1:0,1:1,5:2,2:2,2	1,05	142,3
NHL_10T+10Mk	1:2	1:5	1:0,1:0,1:1,6:2,3:2,3	1,05	148,3

4.3.2. Consistência por espalhamento

Descrição

O ensaio foi realizado de acordo com o preconizado na norma EN 1015-3:1999 [CEN:1999b]. Este é feito com a argamassa fresca, logo após a amassadura, permitindo aferir e quantificar a sua trabalhabilidade. Foi considerado, no âmbito do projeto *METACAL*, que se pretendiam argamassas com uma trabalhabilidade aceitável, e que, à partida, o valor de espalhamento deveria ser da ordem dos 150 ± 10 mm. Neste caso, estipulou-se um valor de água a utilizar para obtenção de argamassas consideradas trabalháveis, realizou-se o ensaio de consistência por espalhamento e foi verificado se o valor do espalhamento correspondia à gama e valores pretendidos.

Procedimento de ensaio

Antes de iniciar o ensaio, a mesa de espalhamento, o molde cónico e o pilão foram humedecidos, de forma a homogeneizar o ensaio entre as várias amostras e deram-se algumas pancadas com a mesa de espalhamento. A argamassa foi colocada no interior do molde, devidamente posicionado no centro da mesa de espalhamento, em duas camadas, entre as quais foram realizadas no mínimo 10 inserções do pilão de forma a eliminar os vazios, garantindo a uniformidade da argamassa. A superfície do molde foi rasada e o molde retirado lentamente. Foram dadas 15 pancadas, por rotação da manivela da mesa de espalhamento, após as quais se mediu o espalhamento da argamassa no mínimo em duas direções distintas.



Figura 4.13 – Procedimento de realização do ensaio de consistência por espalhamento

Tratamento de resultados

Com os valores medidos de cada ensaio obteve-se a consistência de espalhamento de cada amassadura. A partir dos valores de consistência de cada amassadura da mesma argamassa obteve-se o respetivo valor médio e desvio-padrão.

Apresentação e análise de resultados

Na Figura 4.14 são apresentados os resultados de consistência por espalhamento obtidos e ainda os valores da relação água/ligante, obtidos pelo quociente entre a massa de água aplicada na argamassa (considerando 1000g correspondendo a 1 dm³, que por sua vez corresponde a 1 litro) e a massa de ligante, considerando como ligante a soma da NHL 3.5, do T e do Mk.

Todas as argamassas apresentaram trabalhabilidade considerada adequada e todas apresentam uma consistência dentro dos limites considerados adequados, dentro ou perto do intervalo de 150±10mm (Figura 4.14 – limites assinalados com as linhas vermelhas). No caso da argamassa de referência e da NHL_10T os valores são superiores, sendo que no caso desta última, foram adicionados mais 50ml de água na amassadura, além do volume que foi colocado para todas as argamassas, e daí apresentar uma relação água/ligante ligeiramente superior. A referida adição de água deveu-se ao facto de na amassadura, por observação visual, a argamassa NHL_10T aparentar ter reduzida trabalhabilidade.

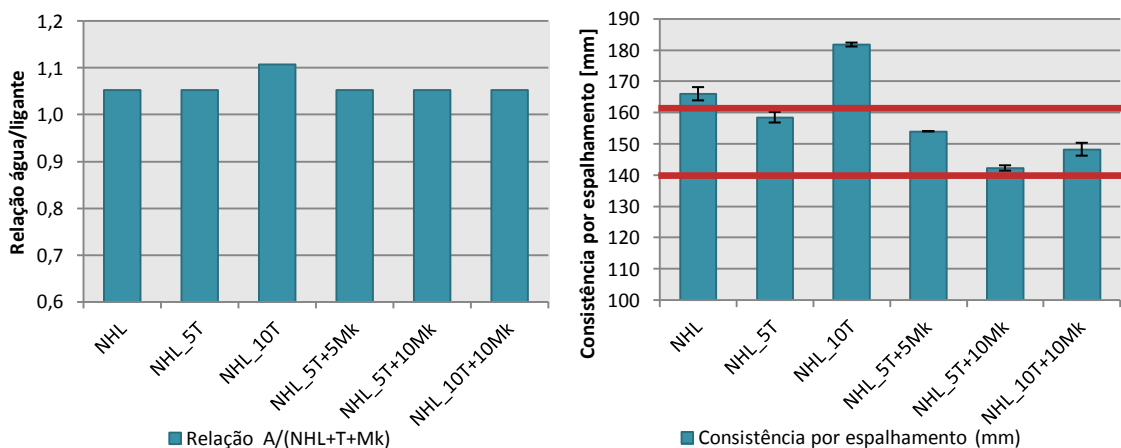


Figura 4.14 – Relação água/ligante e consistência por espalhamento

Na Figura 4.14 constata-se que a substituição de NHL3.5 por T aparenta reduzir, mas apenas muito ligeiramente, a consistência das argamassas frescas, enquanto a redução devido à introdução de Mk parece já ser ligeiramente mais significativa, embora não reduzindo drasticamente a trabalhabilidade.

4.4. Ensaios às argamassas no estado endurecido

Os ensaios realizados sobre o revestimento de argamassa dos tijolos cerâmicos foram:

- Condutibilidade térmica;
- Dureza superficial (métodos do esclerómetro e do durómetro);
- Absorção de água sob baixa pressão (ensaio dos tubos de Karsten);
- Velocidade de propagação de ultra-sons;
- Microestrutura por porosimetria de mercúrio.

Na Figura 4.15 é apresentada a sequência de ensaios que foram realizados aos provetes prismáticos e que serão descritos de seguida.

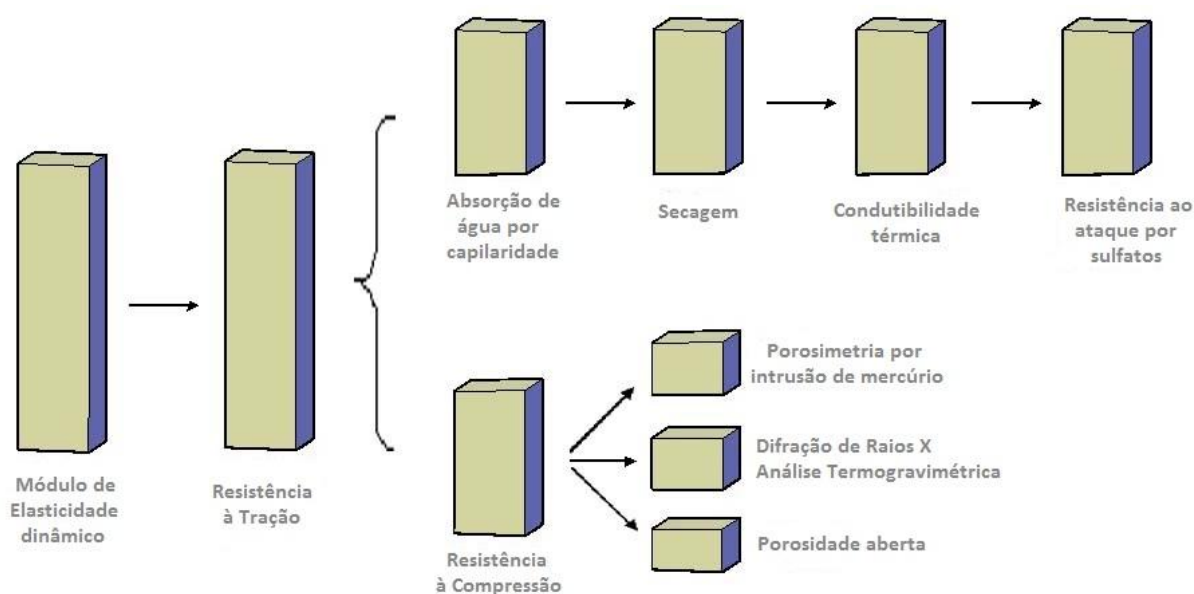


Figura 4.15 – Sequência de ensaios realizados aos provetes prismáticos

4.4.1. Módulo de elasticidade dinâmico

Descrição

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi determinado com base no procedimento descrito na norma NP EN 14146:2006 [IPQ, 2006], definida para ensaio em pedra natural. Este parâmetro permite quantificar a rigidez de um material sólido, possibilitando a caracterização da compatibilidade da argamassa com o suporte onde é aplicada, em termos de deformabilidade.

Esta propriedade é determinada através da medição da frequência fundamental de ressonância longitudinal do material, que corresponde à frequência mais baixa para a qual se obtém a amplitude máxima. Trata-se, portanto, de um ensaio não destrutivo em que os provetes são colocados num equipamento mecânico “ZEUS Resonance Meter”, que emite vibrações numa das extremidades do provete e as recebe no outro, fornecendo diretamente o valor de módulo de elasticidade dinâmico em função da massa e das dimensões do provete.

O ensaio foi realizado aos provetes prismáticos submetidos às três condições de cura, sendo que foram ensaiados três provetes de cada composição de argamassa e de cada condição de cura.

Procedimento de ensaio

Os provetes foram colocados no equipamento, após medição das suas massas, ficando uma das extremidades encostada à fonte emissora da vibração e a outra encostada à unidade de receção. A massa e as dimensões do provete a ensaiar foram inseridas no software ZRM e o equipamento, através de emissão e receção de vibrações longitudinais no provete, calculou o módulo de elasticidade dinâmico.

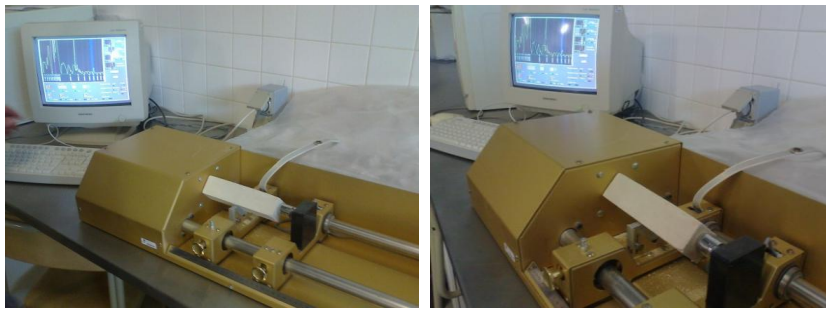


Figura 4.16 – Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico

Observações

Este ensaio, ao contrário dos restantes executados a provetes prismáticos, foi apenas realizado aos 28 dias de idade das argamassas devido a avaria do computador onde estava instalado o software ZRM com o qual funciona o equipamento.

Tratamento de resultados

O software associado ao equipamento “ZEUS Resonance Meter” calcula automaticamente os valores de módulo de elasticidade dinâmico através da *Equação 4.6*.

$$E_d = \frac{4 \times L^2 \times F_L^2 \times \gamma}{g} \times 10^{-6}$$

Equação 4.6

Em que,

- E_d – Módulo de elasticidade dinâmico [MPa = N/mm²]
- L – Comprimento do provete [m]
- F_L – Frequência de ressonância fundamental longitudinal [Hz]
- γ – Peso volúmico [N/m³]
- g – Aceleração gravítica [g=9,80665 m/s²]

No tratamento dos valores de módulo de elasticidade dinâmico fornecidos pelo equipamento foi necessário analisar cuidadosamente qual a faixa de valores a considerar, visto que este forneceu duas ou mais faixas de valores para cada posição do provete.

Apresentação e análise de resultados

A análise do módulo de elasticidade dinâmico permite inferir a deformabilidade da argamassa e ainda a sua tendência em relação às resistências. Um baixo módulo de elasticidade indicia uma tendência de maior deformabilidade da argamassa. Os resultados obtidos podem ser observados na *Figura 4.17*.

Da sua análise pode-se concluir facilmente que as argamassas sujeitas a cura húmida (H) apresentam uma maior rigidez em relação às mesmas composições mas sujeitas a outras condições de cura. Já as argamassas da cura standard (St) apresentam maior deformabilidade.

As argamassas com Mk, à exceção da NHL_5T+5Mk_St, apresentam maior rigidez quando comparadas com as respetivas argamassas de referência. Essas argamassas, nas curas H e SP apresentam também maior rigidez em relação às argamassas com substituição de massa de cal por apenas resíduo cerâmico (T). Já na cura St, o módulo de elasticidade não varia muito quando comparados os resultados entre argamassas com e sem Mk.

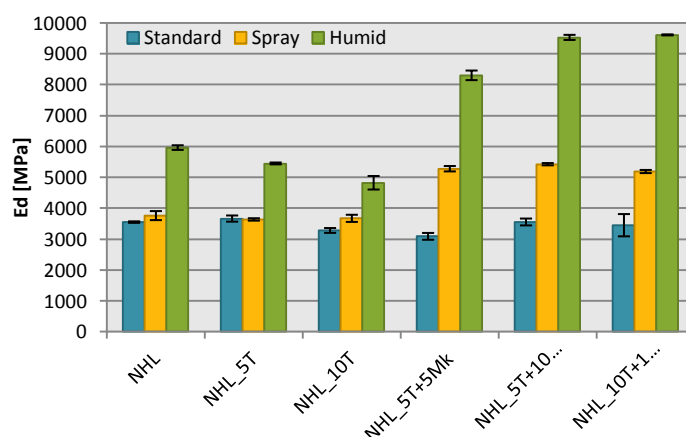


Figura 4.17 – Módulo de elasticidade dinâmico

As argamassas devem ter um módulo de elasticidade muito similar ao do suporte onde são aplicadas, de forma a permitir que possam acompanhar a sua deformação sem fissurar. Assim, para suportes mais antigos e conseqüentemente mais deformáveis, interessam argamassas mais deformáveis. No entanto, como E_d indicia as resistências mecânicas que vão ser obtidas, convém que os valores se encontrem em gamas consideradas adequadas em função do tipo de aplicação das argamassas. Sendo os valores mais baixos da ordem dos 3000 MPa, considera-se que as argamassas da cura St apresentam os valores mais adequados.

4.4.2. Resistência à tração por flexão

Descrição

O ensaio de resistência à tração por flexão (R_t) foi executado conforme o definido na norma EN 1015-11:1999 [CEN, 1999a], com recurso a uma máquina de tração universal “ZWICK Z050” com uma célula de carga de 2kN.

Recorreu-se ao método de flexão por 3 pontos visto que este é o mais eficaz para testar a resistência à tração no caso das argamassas. A execução de um ensaio de tração com recurso a garras não produziria resultados por o provete escorregar das garras ou pela força destas o esmagar. O método das garras é mais utilizado, e mais eficazmente, no caso de ensaios de tração a metais, uma vez que estes são bastante mais resistentes.

O ensaio por flexão consiste na aplicação de um carregamento a meio vão do provete, ficando a sua zona superior comprimida e, conseqüentemente, a zona inferior tracionada. Quando se atinge a carga última, máximo valor de carregamento, a zona tracionada entra em rotura. Trata-se, portanto, de um ensaio destrutivo do qual resultam duas metades do provete, que têm posteriormente tratamentos distintos.

Este ensaio foi realizado em provetes prismáticos aos 28 dias e 90 dias de idade das argamassas, sendo que no caso dos provetes com 28 dias de cura o ensaio foi realizado logo após o ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.

Procedimento de ensaio

O provete foi colocado na posição horizontal e centrado sobre dois apoios, espaçados de 100 mm, tendo o cuidado de a face livre da moldagem, não ficar em contacto com os apoios nem com a célula de carga. A meio vão do provete foi iniciado o carregamento que aumentou de forma constante no tempo até ocorrer a rotura, verificada no software por um decréscimo abrupto da força exercida no provete e verificada no provete por fissuras na zona inferior. A carga última de rotura, correspondente à força máxima verificada no gráfico força-deslocamento traçado pelo software, foi registada e o ensaio concluído.



Figura 4.18 – Ensaio de resistência à tração por flexão

Tratamento de resultados

Os valores da resistência à tração foram obtidos a partir da carga última de rotura determinada nos ensaios de flexão e através da *Equação 4.7*.

$$R_T = \frac{3 \times F_T \times l}{2 \times b \times d^2}$$

Equação 4.7

Em que,

- R_t – Resistência à tração [MPa = N/mm²]
- F_t – Carga última de tração por flexão [N]
- l – Distância entre apoios [mm]
- b – Largura do provete [mm]
- d – Altura do provete [mm]

Apresentação e análise de resultados

A análise da resistência à tração por flexão (R_t) permite inferir a resistência à fendilhação de uma argamassa. As argamassas com valores de R_t superiores terão menor suscetibilidade de fendilhar, desde que os valores de R_t estejam dentro de limites compatíveis com a resistência do suporte.

Os resultados são representados em gráficos de barras de forma a facilitar a análise e a comparação entre as diversas composições e curas. Na *Figura 4.19* são apresentados os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração aos 28 dias das argamassas. Da sua análise pode-se concluir que as argamassas da cura H apresentam valores de R_t superiores, em relação às mesmas composições curadas noutras condições, à exceção das composições com 10% de Mk, em que a cura SP regista valores superiores. Já as argamassas sujeitas à cura St apresentam os valores inferiores, excetuando as argamassas com substituição de NHL3.5 apenas por T, em que as argamassas da cura SP registam valores mais baixos.

Apenas as argamassas com substituição de massa de NHL3.5 por T, nas curas H e SP, apresentam valores de R_t inferiores às das respetivas argamassas de referência; R_t diminui com o

aumento da massa de T. Já nas argamassas com Mk, no caso da cura H, a argamassa com 5% de T e 5% de Mk apresenta um valor superior de R_t em relação à argamassa de referência, mas à medida que as massas de T e Mk aumentam, R_t também diminui. Na cura SP verifica-se a tendência para o aumento de R_t com o aumento das massas de T+Mk. No caso da cura St, todas as composições apresentam valor de R_t superior ao da argamassa de referência. Em relação às argamassas com apenas T em substituição de NHL3.5, R_t diminui com o aumento da percentagem de T. Nas argamassas com Mk, R_t aumenta com o aumento da percentagem de Mk, nas argamassas com 5% de T; no entanto, R_t diminui quando a percentagem de T aumenta.

Na *Figura 4.20* são apresentados os resultados dos ensaios realizados às argamassas aos 90 dias. Em relação aos resultados analisados anteriormente referentes aos 28 dias, as argamassas com 10% de Mk tomam valores superiores na cura H, ao contrário da influência crescente da cura SP aos 28 dias das argamassas.

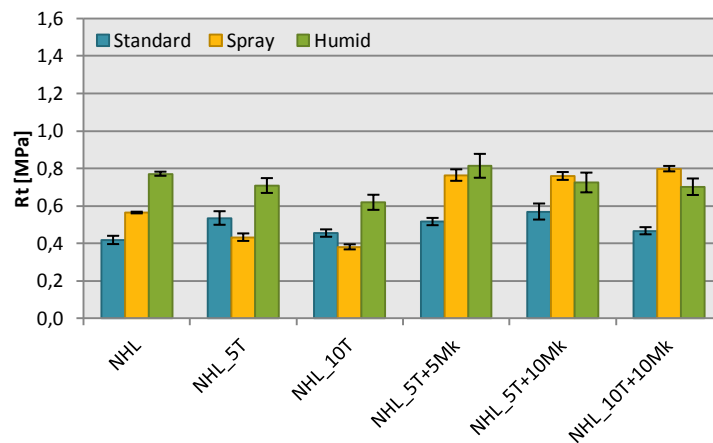


Figura 4.19 – Resistência à tração aos 28 dias

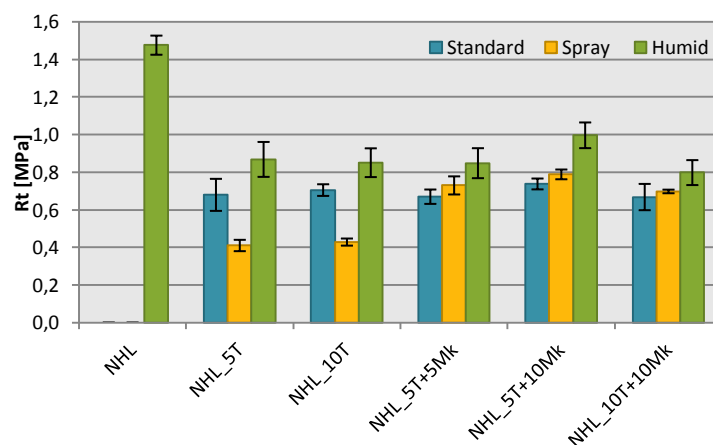


Figura 4.20 – Resistência à tração aos 90 dias

As composições com T em substituição de NHL3.5, em todas as curas, variam muito ligeiramente: no caso das curas SP e St, com um aumento de R_t com o aumento da percentagem de T, e no caso da cura H, com uma diminuição. Em relação às argamassas com Mk, a argamassa com 5% de T e 5% de Mk, nas curas St e H, apresentam valores muito similares aos das composições apenas

com T. Com o aumento da percentagem de Mk, em qualquer uma das curas, verifica-se o aumento do valor de Rt, ao contrário do que acontece aos 28 dias no caso das curas H e SP. Com o aumento da percentagem de T, nas argamassas de composição mista, dá-se uma diminuição de Rt em todas as condições de cura, o que não era verificado na cura SP aos 28 dias.

De forma a comparar o aumento ou diminuição de Rt com a evolução da idade são apresentados na *Figura 4.21* os resultados da resistência à tração aos 90 dias das argamassas em comparação com os valores aos 28 dias. Não foram produzidos provetes suficientes da argamassa de referência. Assim, aos 90 dias de idade, existiam apenas provetes das argamassas de referência da cura H, mas não das curas SP e St. No caso da cura H, o valor médio resultante do ensaio aos provetes de argamassa de referência foi bastante superior ao valor obtido aos 28 dias. Não se encontrou explicação para o facto do aumento ser tão superior ao das restantes argamassas.

Na grande maioria das argamassas, com a evolução da sua idade, o valor de Rt aumentou. No caso de algumas composições sujeitas a cura SP, Rt diminuiu ligeiramente (NHL_5T_SP, NHL_5T+5Mk_SP e NHL_10T+10Mk_SP).

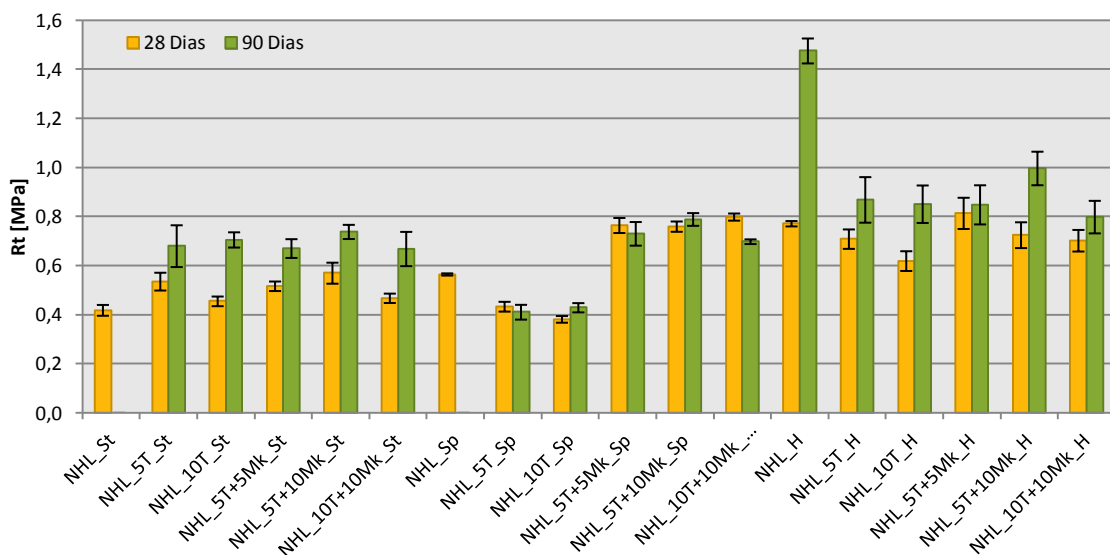


Figura 4.21 – Evolução com a idade das resistências à tração

4.4.3. Dureza superficial

A dureza superficial das argamassas foi medida, aos 150 dias de idade, por dois métodos distintos: método do esclerómetro pendular e método do durómetro. O ensaio com recurso a qualquer um dos aparelhos é de natureza não-destrutiva e foi realizado sobre as argamassas aplicadas no revestimento dos tijolos.

4.4.3.1 Método do esclerómetro pendular

Descrição

No ensaio com o esclerómetro pendular, uma massa com uma determinada energia potencial e devido a um movimento pendular embate na superfície de um material, ocorrendo um ressalto da massa que é tanto maior quanto maior for a dureza do material. Após o impacto, o valor do deslocamento da massa do esclerómetro (devido ao seu ressalto) é designado por índice esclerométrico.

Neste caso o ensaio foi realizado sobre a superfície revestida dos tijolos, em dois pontos distintos, em cada um dos quais foram realizadas dez leituras. O ensaio, além de avaliar a dureza da superfície das argamassas, permite ainda aferir a homogeneidade das mesmas.

Procedimento

O esclerómetro pendular tipo PT foi posicionado sobre o revestimento do tijolo cerâmico num ponto pré-definido e o pêndulo foi libertado. Após o impacto registou-se o valor do ressalto, consultado da escala graduada localizada no aparelho.

Tratamento de resultados

Os valores finais de dureza superficial de cada argamassa, pelo método do esclerómetro pendular e representados num gráfico de barras, foram obtidos através do cálculo do valor médio entre os obtidos nas dez medições num só ponto, tendo sido posteriormente calculado um novo valor médio entre a dureza média obtida em cada um dos dois pontos numa argamassa.

4.4.3.2 Método do durómetro

Descrição

O recurso ao durómetro também permite avaliar a dureza superficial da argamassa; o seu funcionamento baseia-se na avaliação da resistência à penetração de um pino que é pressionado contra o material. Existem diferentes escalas de dureza entre os durómetros (Shore A a D). Neste caso foi utilizado o durómetro “Shore A”, embora este seja apropriado para materiais macios. O ensaio foi realizado em cerca de dez pontos do reboco dos tijolos.

Procedimento

O durómetro Shore A foi posicionado no revestimento do tijolo, tendo o cuidado de seleccionar uma superfície o mais plana possível. Para efetuar as leituras, pressionou-se o pino do durómetro contra a argamassa e registou-se o valor de dureza marcado no aparelho.

Tratamento de resultados

Os resultados de dureza superficial pelo método do durómetro foram obtidos através do cálculo do valor médio entre os resultados das dez medições, para cada uma das argamassas e os resultados foram apresentados num gráfico de barras.

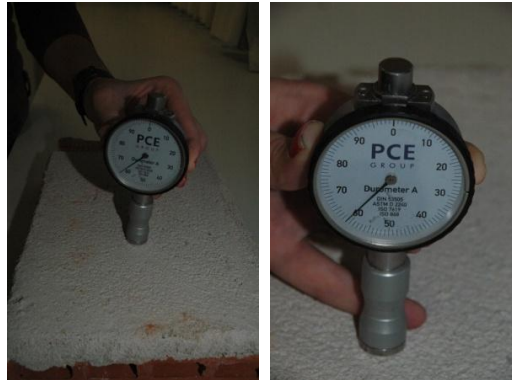


Figura 4.22 – Durómetro

Apresentação e análise de resultados

Na Figura 4.23 são apresentados os valores da dureza superficial resultantes do método do esclerómetro e do método do durómetro. Em qualquer um dos métodos, no caso de algumas composições verificam-se desvios grandes entre as diversas leituras, para cada uma das amostras. Os resultados também não apresentam grandes tendências e são interpretados com alguma desconfiança uma vez que o esclerómetro é mais adequado para aplicações realizadas sobre paredes, enquanto o durómetro utilizado é adequado para materiais mais deformáveis; no entanto os resultados são aqui referidos como forma mostrar as dificuldades encontradas.

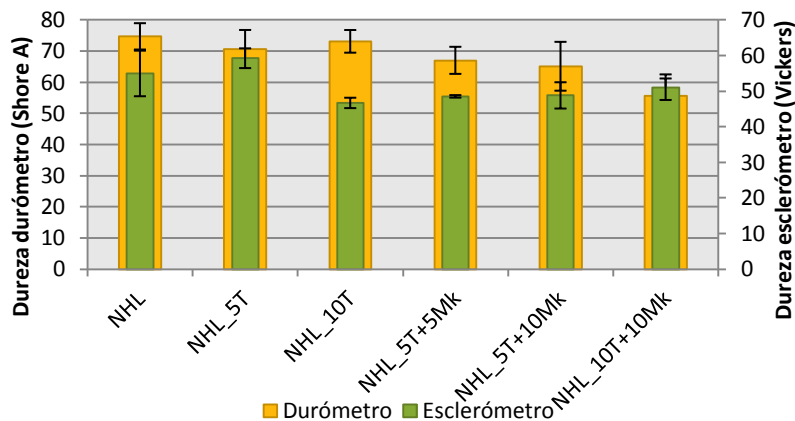


Figura 4.23 – Dureza superficial pelos métodos do esclerómetro e do durómetro

No caso do esclerómetro, tal como foi referido, é difícil encontrar qualquer tendência. Todas as argamassas, à exceção da NHL_5T, apresentam dureza inferior à da argamassa de referência. Nas argamassas com apenas T em substituição de cal, com o aumento do teor de T a dureza diminui.

Nas argamassas com Mk, a dureza mantém-se praticamente inalterada com o aumento do teor de Mk; no entanto a dureza já aumenta com o aumento do teor de T.

Em relação ao durómetro, as tendências são contrárias. Nas argamassas com apenas T, com o aumento do seu teor, a dureza aumenta. Nas argamassas com Mk, a dureza diminui com o aumento do teor de Mk, e ainda mais com o aumento do teor de T e de Mk, comparativamente a NHL_5T+5Mk. É possível ainda reparar que as argamassas com Mk apresentam menor dureza superficial que as restantes argamassas; no entanto a resistência à compressão, para as mesmas composições, apresenta os valores mais elevados e, tal como foi referido anteriormente, os desvios padrão são elevados, pelo que as tendências tornam-se menos credíveis.

4.4.4. Resistência à compressão

Descrição

Este ensaio foi realizado logo após o ensaio de resistência à tração por flexão, utilizando-se uma das metades dos provetes resultantes. À semelhança do referido ensaio, também este foi realizado segundo o procedimento estipulado pela norma EN 1015-11:1999 [CEN, 1999a] e utilizando a máquina de tração universal “ZWICK Z050”, mas neste caso com uma célula de carga de 50kN.

No ensaio de compressão é aplicado um carregamento, numa área de 40x40 mm², que aumenta constantemente até se dar a rotura. No processo de compressão é observável o “Efeito de Poisson” [HENRIQUES, 2009], uma vez que a compressão na direção transversal do provete origina expansão na direção longitudinal.

Procedimento

Uma metade do provete foi colocada na posição horizontal sensivelmente no centro de um acessório metálico, sobre a qual ainda foi encaixada uma peça onde a prensa da máquina de tração universal exerceu o carregamento. A superfície da referida peça ficou em contacto com a face do provete numa área de 40x40 mm², a designada área de secção comprimida.

O carregamento aumentou uniformemente até ocorrer rotura. Foi registado de seguida o valor da carga última de rotura, correspondente ao valor máximo de força aplicada ao provete e verificável no gráfico força-deslocamento traçado pelo software.



Figura 4.24 – Ensaio de resistência à compressão

Tratamento de resultados

Os valores de resistência à compressão resultaram do quociente entre a carga última de compressão e a área da secção comprimida. A resistência à compressão (R_c) de uma argamassa deve apresentar valores da mesma ordem de grandeza que os do suporte, onde seja aplicada, de forma a evitar o desenvolvimento de tensões.

Apresentação e análise de resultados

Os valores médios de R_c para cada argamassa, e em cada condição de cura, são representados em gráficos de barras. Na *Figura 4.25* estão representados os valores de resistência à compressão das argamassas aos 28 dias de idade. Da sua análise é possível concluir facilmente que as argamassas com Mk apresentam valores de R_c significativamente superiores aos das argamassas de referência ou com apenas T em substituição de NHL3.5. As argamassas sujeitas a cura H apresentam maior R_c quando comparadas com as mesmas composições mas sujeitas às curas SP ou St. A cura St, na análise das argamassas de referência e das com T em substituição de NHL3.5, conduz a valores inferiores; no entanto, quando se tratam de argamassas com Mk, são as argamassas sujeitas a cura SP que apresentam valores inferiores de R_c (não sendo muito significativa a diferença na NHL_5T+5Mk entre as curas SP e St).

No caso da argamassa de referência, na cura H, o valor de R_c é significativamente superior aos da mesma composição sujeita às restantes curas. Da argamassa de referência para as argamassas com apenas T, especialmente com o aumento da dosagem de T, é perceptível uma diminuição da R_c , sobretudo na cura H. Nas curas St e SP tal diminuição não é muito significativa.

Nas composições com Mk, sujeitas a cura H, os valores de R_c aumentam com o aumento das dosagens de T e Mk. No caso das curas SP e St, as argamassas NHL_5T+10Mk apresentam um valor superior de R_c em relação às restantes composições com Mk.

Na *Figura 4.26* são apresentados os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão aos 90 dias de idade. As argamassas sujeitas a cura H, que aos 28 dias já apresentavam valores superiores aos das restantes curas, nesta idade apresentam uma diferença ainda mais significativa. As tendências que as argamassas apresentam aos 28 dias, referidas anteriormente, mantêm-se aos 90 dias, à exceção da NHL_10T+10Mk_H em que, com o aumento da percentagem de T, R_c diminui. Os valores de R_c nas argamassas sujeitas às curas SP e St mantêm-se muito próximas inclusivamente nas argamassas com 10% de Mk, ao contrário do apresentado aos 28 dias.

Na *Figura 4.27* é apresentada a evolução com a idade da resistência à compressão das argamassas aos 28 dias e aos 90 dias de idade. Na cura H, R_c aumenta significativamente com a evolução da idade. Nas curas SP e St, a variação dos valores de R_c não é tão significativa. Em todas as argamassas sujeitas a cura St, R_c diminui dos 28 para os 90 dias. Já nas argamassas sujeitas a cura SP, à exceção da NHL_5T+5Mk, R_c aumenta ligeiramente.

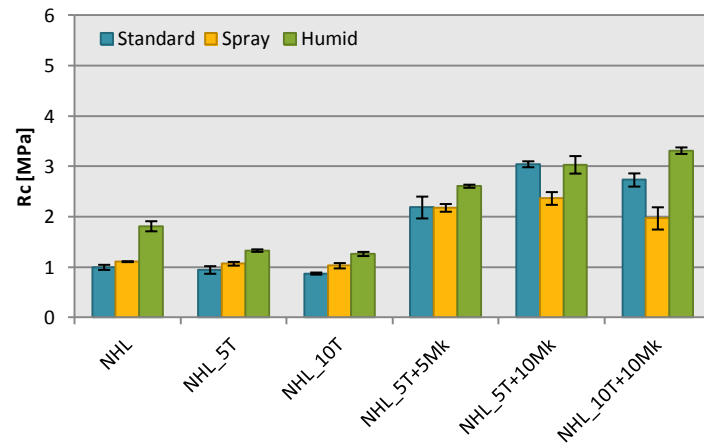


Figura 4.25 – Resistência à compressão aos 28 dias

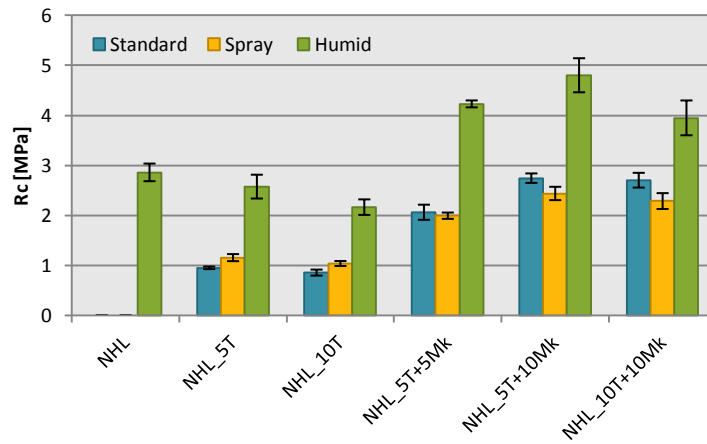


Figura 4.26 – Resistência à compressão aos 90 dias

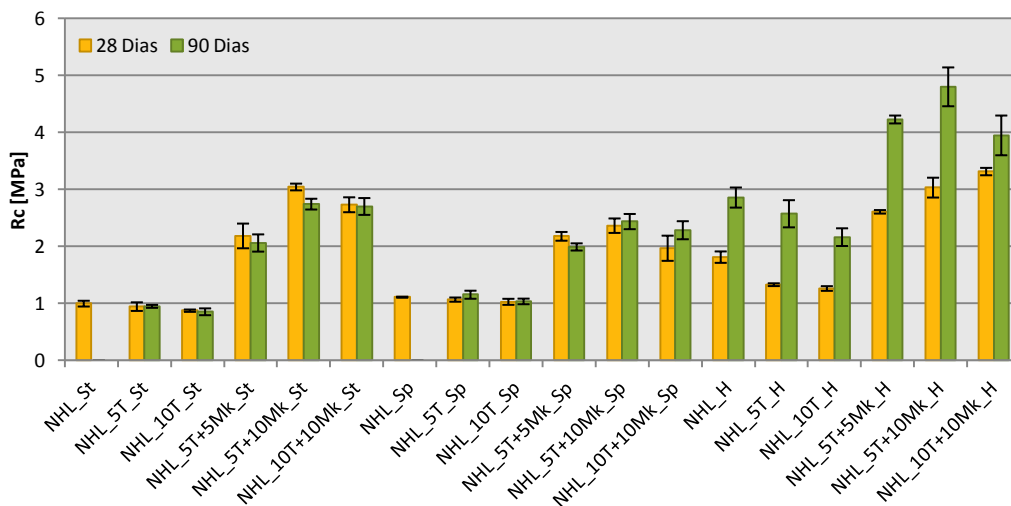


Figura 4.27 – Evolução com a idade das resistências à compressão

4.4.5. Condutibilidade térmica

Descrição

A condutibilidade térmica (λ) traduz a maior ou menor facilidade de transferência de calor por parte dos materiais, isto é, a capacidade de um material se deixar atravessar por calor. Esta trata-se de uma propriedade intrínseca aos materiais homogêneos. A condutibilidade térmica está relacionada com a porosidade aberta do material, na medida em que uma argamassa mais porosa terá maior tendência a um menor valor de condutibilidade térmica.

Neste caso, foi analisada a condutibilidade térmica em duas faces opostas dos provetes prismáticos (ou em três faces à exceção da face livre aquando a moldagem dos provetes) e em seis pontos na face com reboco de tijolos, conforme representado na *Figura 4.28*.

O ensaio foi realizado com recurso ao equipamento Heat Transfer Analyzer, model 2104 da ISOMET, cujo funcionamento baseia-se na transferência de calor para argamassa e na quantificação do calor que é recebido, face ao emitido. O valor de condutibilidade térmica corresponde ao diferencial entre o calor emitido e recebido, pelo que quanto menor o valor do calor recebido, maior o calor dissipado, maior será esse diferencial e, logo, maior será a condutibilidade térmica da argamassa.

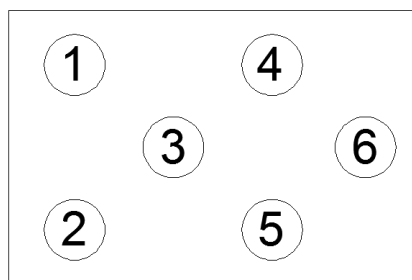


Figura 4.28 – Disposição dos pontos de medição de condutibilidade térmica nos tijolos

O sensor deveria ficar em total contacto com a amostra em análise. No caso da análise aos tijolos o referido critério é satisfeito; no entanto, no caso dos provetes, a largura das suas faces é inferior ao diâmetro do sensor. Assim considera-se que os valores obtidos nesta situação não são completamente fidedignos mas servem como termo comparativo da condutibilidade térmica entre as diversas composições e curas analisadas através e provetes com iguais dimensões.

Na realização do ensaio foi colocada uma pequena placa de poliestireno extrudido sob a amostra, de forma a evitar que o calor fosse transferido para o suporte onde decorreu o ensaio.

Procedimento

O tijolo ou o provete foi colocado sobre uma placa de poliestireno extrudido (XPS). A célula, com intervalo de medições de 0,3-2,0 W/m°C e devidamente ligada ao aparelho, foi colocada numa posição pré-definida da amostra e foi iniciado o ensaio. Registou-se o valor de condutibilidade térmica fornecido pelo equipamento e alterou-se a posição da célula, repetindo-se de seguida o processo.



Figura 4.29 – Medição de condutibilidade térmica no provete e no tijolo revestido

Tratamento de resultados

O equipamento utilizado fornece diretamente valores de condutibilidade térmica; no entanto, como em cada provete foram feitas duas medições e seis em cada tijolo, foi necessário fazer a média aritmética entre as várias medições, para cada amostra. No caso dos provetes, visto existirem três provetes de cada argamassa, foram ainda calculados os valores médios de condutibilidade térmica para cada amostra.

Apresentação e análise de resultados

Os resultados obtidos foram introduzidos num gráfico de barras. Na *Figura 4.30* estão apresentados os resultados de condutibilidade térmica aos 28 dias das argamassas. A argamassa de referência sujeita a cura H é a que apresenta maior λ , já a mesma composição sujeita a cura St apresenta o menor valor. As argamassas com Mk sujeitas a cura H apresentam λ superior em comparação com as restantes condições de cura para uma mesma composição, embora na NHL_5T+10Mk a diferença para a cura SP seja mínima. Nas argamassas com T em substituição de cal verifica-se que a cura SP apresenta valores superiores de λ , mas na NHL_5T as diferenças para as outras curas não são significativas.

Em relação às argamassas com Mk, λ diminui com o aumento dos teores de Mk e de T, nas curas H e St. No caso da cura SP, λ aumenta com o aumento de Mk de 5% para 10% e para a mesma percentagem de T (5%). No entanto, λ diminui com o aumento do teor de T para 10%. Na cura St, com a substituição de massa de cal por 5% de T, λ aumenta, comparativamente à argamassa de referência; no entanto, λ diminui com o aumento dessa percentagem. Na cura SP, λ aumenta com a substituição de massa de cal por 5% de T e λ aumenta com o aumento da dosagem de T. No caso da cura H a tendência é contrária: λ diminui com a adoção de T e respetivo aumento da sua dosagem.

Na *Figura 4.31* estão representados os valores resultantes do ensaio de condutibilidade térmica aos 90 dias de idade das argamassas. Por observação da figura conclui-se facilmente que a cura H apresenta valores de λ significativamente superiores aos das restantes curas para todas as composições em estudo. Já as argamassas sujeitas a cura St são as que apresentam valores de λ inferiores. Apesar de não ser conhecido o comportamento da argamassa de referência quando sujeita

às curas SP e St, é possível verificar que na cura H continua a ser a argamassa que apresenta valor superior de λ .

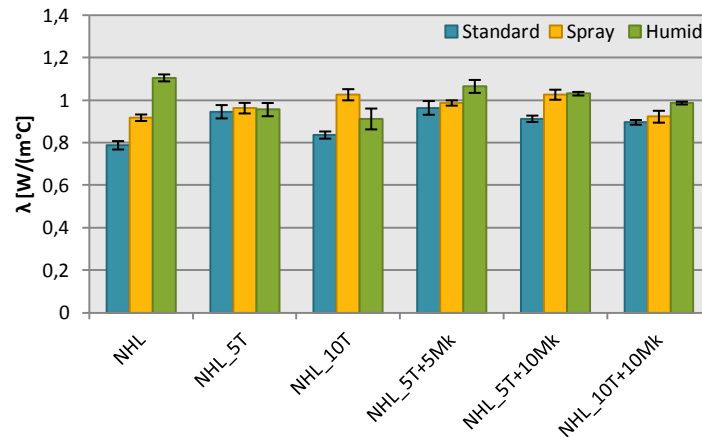


Figura 4.30 – Condutibilidade térmica aos 28 dias

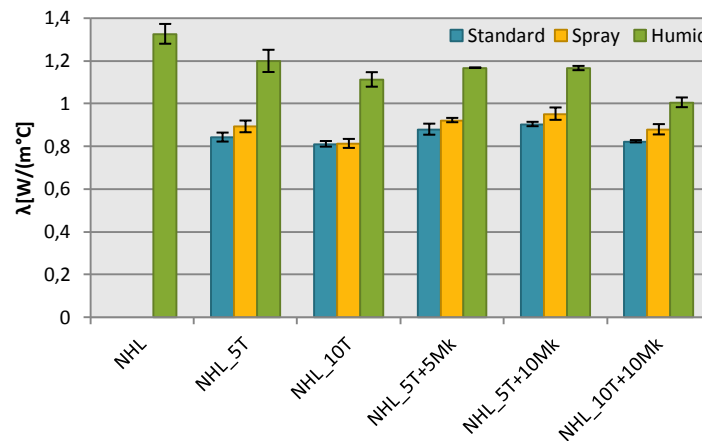


Figura 4.31 – Condutibilidade térmica aos 90 dias

Nas argamassas com apenas T em substituição de cal verifica-se, para qualquer uma das condições de cura, o decréscimo do valor de λ com o aumento da dosagem de T. Em relação às argamassas com Mk, e em comparação com a composição NHL_5T+5Mk sujeita a qualquer uma das curas, quando a dosagem de Mk aumenta e a de T se mantém, λ aumenta, apesar das variações não serem significativas. No entanto, λ diminui com o aumento da dosagem de T.

Na Figura 4.32 está representada a evolução com a idade da condutibilidade térmica das argamassas. As argamassas sujeitas às curas St e SP apresentam valores superiores de λ aos 28 dias de idade, ao contrário do verificado no caso da cura H, em que os valores aos 90 dias são expressivamente superiores. Pela observação da figura também se conclui uma clara tendência para a cura H apresentar valores superiores de λ .

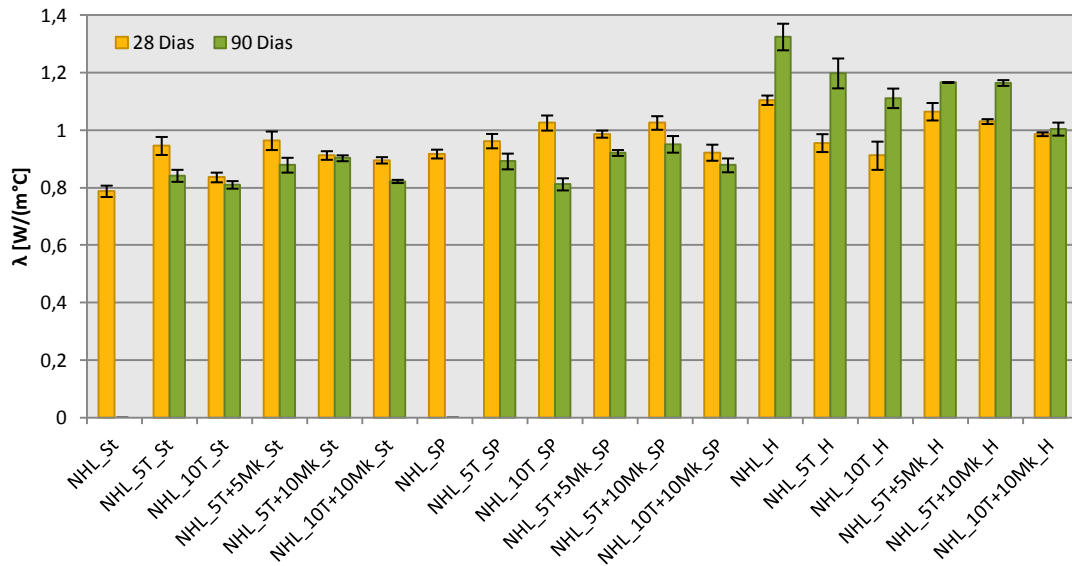


Figura 4.32 – Evolução com idade da condutibilidade térmica

Na Figura 4.33 estão representados os resultados de condutibilidade térmica obtidos quando feito o ensaio nos tijolos revestidos e ainda os resultados referentes aos ensaios aos provetes prismáticos das argamassas sujeitas a cura SP nas duas idades. Relativamente aos resultados das argamassas aplicadas nos tijolos, as composições com Mk apresentam valores de λ inferiores aos das argamassas de referência e com apenas T em substituição de cal. Tal diferença não se verificou no caso do estudo dos provetes sujeitos a cura SP. Ainda em relação aos resultados das argamassas a revestir os tijolos, em comparação com a argamassa de referência, a NHL_5T apresenta um valor inferior de λ ; no entanto, com o aumento do teor de T, verifica-se uma tendência para o aumento de λ , apresentando até um valor superior ao da argamassa de referência. Em relação às argamassas com Mk, λ diminui com o aumento do teor de Mk para 10%, mantendo o teor de T em 5% (em comparação com NHL_5T+5Mk). No entanto, λ tem tendência para aumentar com o aumento do teor de T.

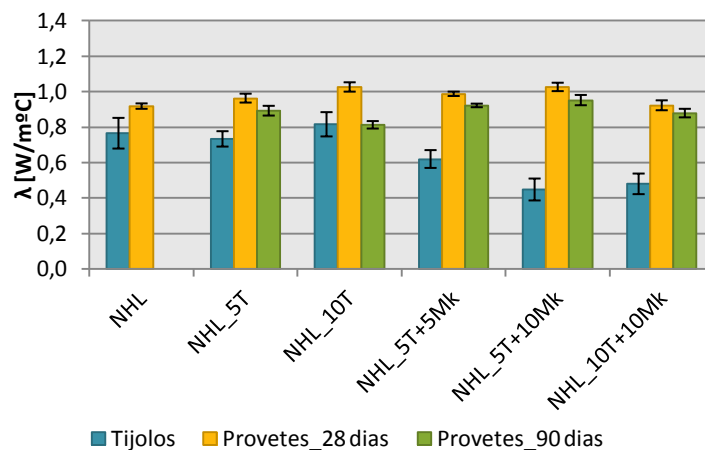


Figura 4.33 – Condutibilidade térmica medida nos tijolos

Para qualquer uma das composições, e em qualquer idade dos provetes analisados, à exceção da NHL_10T aos 90 dias de idade, as argamassas aplicadas nos tijolos apresentam menores valores de λ , sendo a diferença particularmente significativa no caso das argamassas com Mk.

4.4.6. Velocidade de propagação de ultra-sons

Descrição

O ensaio de ultra-sons trata-se de uma técnica não-destrutiva que, através do tempo de propagação de ondas ultra-sónicas desde o transdutor emissor até ao recetor, permite avaliar as características mecânicas de uma argamassa, tais como a sua homogeneidade, resistência mecânica, presença de fissuração e/ou fendilhação, existência de vazios e porosidade.

O equipamento de ultra-sons *Pundit Lab* da *Proceq* não só emite as ondas ultra-sónicas e as recebe através de transdutores, como ainda regista o tempo em micro-segundos (μs) que a onda demora a ser propagada através do material. Quanto mais compacto este for, menor será o tempo de propagação. Se pelo contrário, existirem anomalias ou o material for muito poroso, o tempo de propagação das ondas será maior.

O ensaio foi executado segundo o método indireto, uma vez que foi realizado sobre a superfície da camada de revestimento dos tijolos. Foi definida uma planificação de pontos (*Figura 4.101*) a combinar leituras entre o transdutor emissor e o recetor. Foram feitas cerca de três leituras para cada combinação de pontos (A-B; A-C; A-E; A-F; F-B; F-C; F-E).

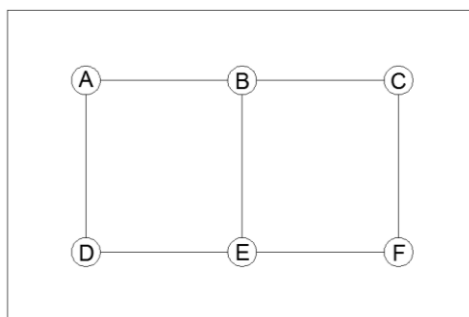


Figura 4.34 – Pontos para leituras de propagação de ultra-sons

Nota: Não foi possível realizar leituras A-D nem F-D porque o recobrimento de argamassa na zona do ponto D foi entretanto cortada para uso no ensaio de porosimetria de mercúrio.

Procedimento

Antes do início do ensaio foram marcados, na superfície revestida do tijolo, os cinco pontos de estudo (A, B, C, E e F). Durante as medições o transdutor emissor foi fixo no ponto A e o transdutor recetor foi movido entre os restantes pontos, sendo que para cada conjunto de pontos foram feitas

três leituras de velocidades. Posteriormente fixou-se o transdutor emissor no ponto F e repetiu-se o processo.



Figura 4.35 – Ensaio de propagação de ultra-sons

Observações

Na argamassa NHL_10T+10Mk, dado o destacamento da argamassa do tijolo, o ensaio foi realizado com o reboco sobre o tijolo e com o reboco sobre uma placa de poliestireno extrudido.

Tratamento de resultados

A velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas resulta do quociente entre a distância entre um conjunto de pontos e o tempo médio de propagação de ondas entre os mesmos. Assim foi calculada a velocidade de propagação entre cada conjunto de pontos e posteriormente a velocidade média de propagação para cada argamassa.

Através da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas é possível calcular o módulo de elasticidade dinâmico da argamassa. No entanto, visto ser desconhecida a massa volúmica aparente do reboco e não ser possível calculá-la de forma rigorosa optou-se por não calcular o módulo de elasticidade dinâmico e comparar apenas velocidades de propagação, de forma a ter uma ideia da compactidade das argamassas.

Apresentação e análise de resultados

Na *Figura 4.36* estão representadas as velocidades de propagação de ondas ultra-sónicas para as diversas argamassas, sendo que no caso da NHL_10T+10Mk os resultados são diferenciados entre a placa de reboco ensaiada sobre o tijolo (NHL_10T+10Mk_1) e sobre o XPS (NHL_10T+10Mk_2).

As argamassas com 10% de Mk apresentam menores velocidades de propagação, o que poderá indiciar uma menor compactidade. Entre a argamassa NHL_10T+10Mk ensaiada das duas formas distintas, a diferença de resultados não é muito significativa; no entanto não se pode garantir que se o reboco estivesse aderido, os resultados seriam semelhantes, uma vez que também neste caso não é conhecida a influência do suporte.

A argamassa com substituição de cal por 10% de T apresenta a velocidade de propagação mais elevada, podendo ser considerada a mais compacta. No entanto também apresenta um desvio padrão excessivo, que poderá ser causado por anomalias como microfissuras localizadas nas zonas onde a velocidade de propagação é inferior.

Verifica-se a tendência de, com o aumento de T (nas argamassas sem Mk), a velocidade aumentar; já nas argamassas com Mk e com o aumento do seu teor, a tendência é para a diminuição da velocidade.

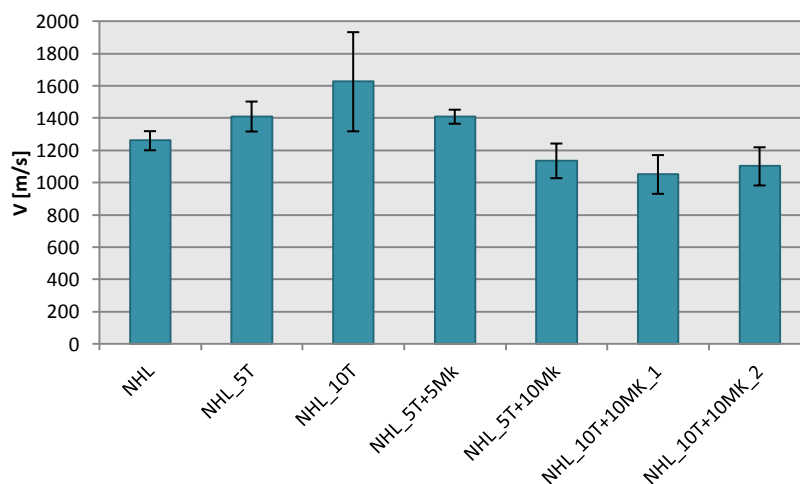


Figura 4.36 – Velocidades de propagação de ultra-sons

4.4.7. Absorção de água por capilaridade

Descrição

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado com base nas normas europeias EN 15801:2009 [CEN, 2009] e EN 1015-18:2002 [CEN, 2002]. Foram estudadas metades de provetes prismáticos (de volume médio semelhante) de argamassas com 28 e 90 dias de idade e de todas as condições de cura.

O objetivo do referido ensaio é estudar o comportamento das argamassas face à água líquida. Com os resultados obtidos é possível determinar o coeficiente de capilaridade (CC) das argamassas e o respetivo valor assintótico (VA). O coeficiente de capilaridade representa a velocidade de absorção de água no início do processo. Já o valor assintótico permite quantificar a massa total de água que é absorvida por uma área de 1m^2 de argamassa em contacto com a água.

Na caracterização da eficiência da argamassa em relação ao comportamento à água, pretende-se que a velocidade de absorção seja o mais baixa possível, portanto, pretende-se que a argamassa apresente um valor baixo do coeficiente de capilaridade. Também é desejável que absorva a menor quantidade de água possível, portanto, que apresente baixos valores assintóticos.

Procedimento de ensaio

Após os provetes serem submetidos ao ensaio de resistência à flexão, uma das metades de cada provete foi colocada em estufa ventilada a $60\pm 5^{\circ}\text{C}$, de forma a garantir que os provetes estivessem completamente secos no início do ensaio de absorção por capilaridade. Os provetes permaneceram na estufa cerca de 48h. As faces laterais dos provetes foram envolvidas, após o seu arrefecimento, com película aderente, tendo o cuidado de evitar que a película obstruísse a base ou o topo dos provetes.

O ensaio decorreu numa caixa de plástico com tampa, onde foi colocada uma massa de água com o intuito de criar ambiente perto da saturação em termos de humidade relativa. O tabuleiro onde foram colocados os provetes foi assente, devidamente nivelado, em dois tijolos no interior da caixa. No tabuleiro foi colocada uma rede de borracha (ocupando toda a área da base) e uma lâmina de água com altura de 5 mm sobre a base. A rede de borracha teve como função permitir que a água no interior do tabuleiro tivesse acesso à base dos provetes.

O ensaio foi iniciado com a medição das massas secas dos provetes, seguida da sua colocação no interior do tabuleiro em contacto com a lâmina de água. Mediu-se posteriormente a massa dos provetes após 5, 10, 15, 30 minutos e 1 hora após a sua colocação no tabuleiro. A partir daí as medições foram efetuadas de hora em hora até os provetes estarem próximos da saturação. Posteriormente as medições foram realizadas de 24 em 24 horas até a variação de massa dos provetes ser inferior a 1%.

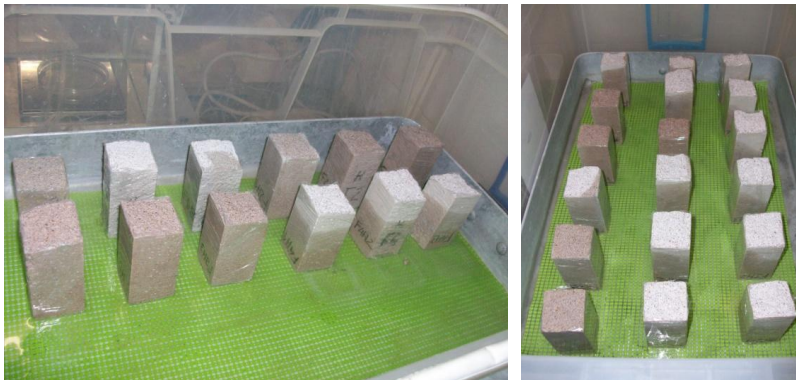


Figura 4.37 – Ensaio de absorção de água por capilaridade

Observações

O ensaio decorreu em sala condicionada à temperatura de $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e com condições de humidade relativa de $65\pm 5\%$.

Foi tido o cuidado de manter a tampa da caixa fechada, sempre que possível.

O nível da lâmina de água no tabuleiro foi verificado inúmeras vezes, com recurso a uma régua metálica, principalmente durante os primeiros minutos e horas do ensaio, de forma a manter uma lâmina de água constante. Adicionou-se mais água sempre que necessário, tendo o cuidado de não molhar os provetes.

Através de observações oculares durante as primeiras horas do ensaio foi possível concluir que os provetes apenas com T foram mais rápidos a ficar praticamente saturados quando comparados com os restantes. Também se verificou que os provetes da cura húmida foram os mais demorados até atingir um ponto próximo da saturação.

Tratamento de resultados

A quantidade de água absorvida até cada instante de tempo t , em que foi efetuada uma medição de massa, é resultado do quociente entre a massa absorvida até ao momento t (resultado da diferença entre a massa do provete no momento t e a massa inicial do provete) e a área de absorção. Traçaram-se as curvas de absorção capilar, isto é, gráficos que relacionam a quantidade de água absorvida com a raiz quadrada do tempo decorrido após o início do ensaio. As curvas foram traçadas para cada provete isoladamente e para o valor médio dos três provetes da mesma argamassa e da mesma condição de cura.

O CC corresponde ao declive do troço recto das curvas de absorção capilar. Quanto menor o declive do troço, menor CC e portanto mais lenta a absorção. Foi calculado um valor de CC para cada provete e posteriormente o valor médio de CC da argamassa e o seu desvio padrão.

O VA, visto tratar-se da máxima quantidade de água absorvida pela argamassa, corresponde ao valor médio da quantidade de água absorvida até à última medição de massa realizada no ensaio.

Apresentação e análise de resultados

Nas Figuras 4.38 e 4.39 estão representadas as curvas de capilaridade aos 28 e 90 dias das argamassas, respetivamente. Na representação gráfica, a mesma composição é representada pela mesma cor; no entanto, no caso da cura H a linha é contínua, na cura SP a linha é tracejada e na cura St a linha é traço-dois pontos.

Pela análise das curvas resultantes do ensaio aos 28 dias depreende-se que as argamassas com Mk da cura H são as mais lentas a atingir um ponto próximo da saturação, tal como já tinha sido referido nas observações oculares feitas durante o ensaio. Pelo contrário, as argamassas de referência e com 10% de T, sujeitas cura St, são as mais rápidas a absorver água por capilaridade. As argamassas com 10% de Mk da cura anteriormente referida são as que absorvem maior quantidade de água. Já a argamassa de referência sujeita a cura H e a NHL_5T da cura SP são as composições que absorvem menor quantidade. Aos 90 dias mantêm-se as tendências já verificadas aos 28 dias; no entanto, a NHL_5T+5Mk torna-se uma das argamassas a absorver água mais rapidamente e em maior quantidade.

As curvas de capilaridade são apresentadas apenas até às 24h de ensaio de forma a garantir uma melhor percepção das tendências de absorção no início do ensaio. De qualquer forma, a tendência da quantidade de água absorvida por cada argamassa fica logo definida nas primeiras horas de

ensaio, uma vez que os provetes ficam praticamente saturados e a sua massa já não sofre alterações significativas.

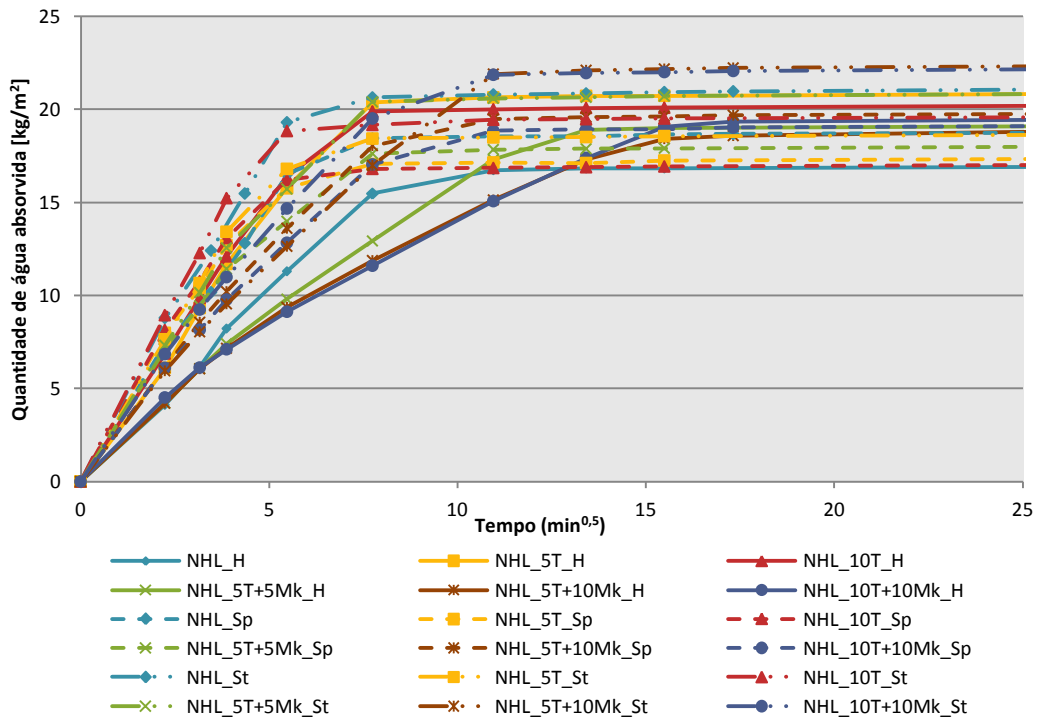


Figura 4.38 – Curvas de capilaridade aos 28 dias

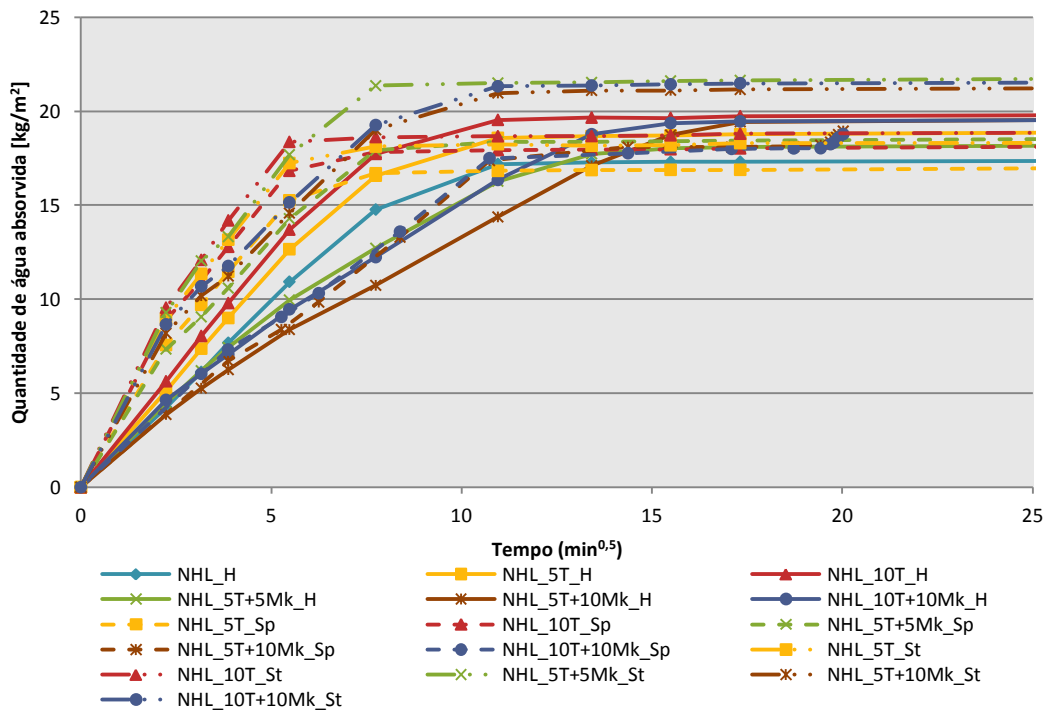


Figura 4.39 – Curvas de capilaridade aos 90 dias

Os valores de CC e VA foram representados em gráficos de barras. Na *Figura 4.40* estão representados os valores de CC das argamassas aos 28 dias. As argamassas com Mk apresentam valores de CC inferiores aos das restantes composições, em qualquer uma das curas estudadas. No caso da cura H, as argamassas com substituição de cal por apenas T apresentam os valores de CC mais elevados, comparativamente às restantes composições na mesma cura; na cura St, é a argamassa de referência que apresenta CC superior; na cura SP os valores de CC são muito semelhantes entre as composições sem Mk. Na comparação entre curas, a cura H apresenta, para todas as composições, os valores mais baixos de CC, apresentando no entanto valores muito próximos dos da cura SP nas argamassas com apenas T. A cura St apresenta os valores mais elevados, à exceção da NHL_5T+10Mk em que a cura SP toma um valor ligeiramente superior.

Na cura H, da argamassa de referência para a argamassa com 5% de T, e com o aumento da dosagem de T, CC aumenta, embora a diferença entre os valores da NHL_5T para a NHL_10T seja muito ligeira. Nas curas St e SP, CC diminui da argamassa de referência para a com 5% de T; no entanto, CC aumenta com o aumento da dosagem de T. Tais tendências são muito evidentes na cura St e bastante ligeiras na cura SP. Em qualquer uma das curas, da argamassa de referência para a argamassa mista NHL_5T+5Mk verifica-se que os valores de CC diminuem. Nas curas H e SP, com o aumento das dosagens de T e Mk verifica-se uma diminuição pouco significativa dos valores de CC. Já na cura St, CC diminui com 5% de T e como o aumento do teor de Mk, mas aumenta com o aumento do teor de T.

O coeficiente de capilaridade das argamassas aos 90 dias está representado na *Figura 4.41*. As argamassas aos 90 dias mantêm as mesmas tendências e a mesmas diferenças, comparativamente às argamassas aos 28 dias, entre condições de cura e entre as diversas composições, salvo algumas exceções. Neste caso, todas as argamassas da cura St, sem exceções, apresentam os valores mais elevados de CC, sendo portanto as argamassas mais rápidas a absorver água até um ponto próximo da saturação. Na argamassa NHL_10T+10Mk sujeita às curas SP e H, CC aumenta, com o aumento da dosagem de T, à semelhança do que acontece na mesma argamassa sujeita a cura St nas duas idades analisadas.

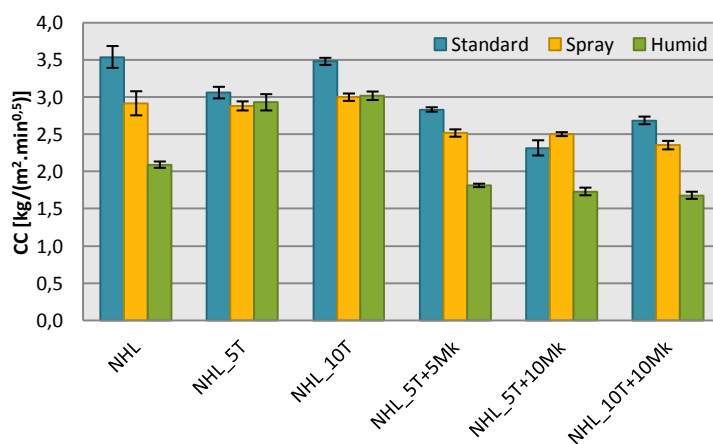


Figura 4.40 – Coeficiente de capilaridade aos 28 dias

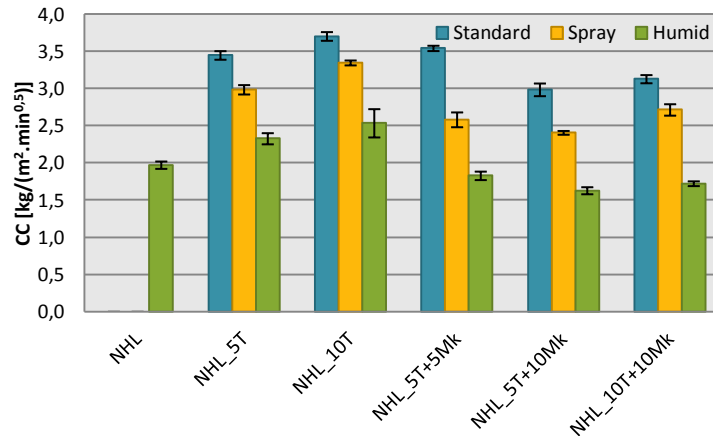


Figura 4.41 – Coeficiente de capilaridade aos 90 dias

Aos 90 dias as diferenças entre os valores de CC entre as várias curas numa mesma composição são mais evidentes do que o verificado aos 28 dias, sobretudo nas argamassas com apenas T em substituição de cal nas curas SP e H.

Na Figura 4.42 está representada a evolução com a idade do coeficiente de capilaridade. CC diminui na cura H, dos 28 para os 90 dias de idade, à exceção das argamassas NHL_5T+5Mk e NHL_10T+10Mk em que se verifica um ligeiro aumento do valor. A diminuição de CC é mais significativa nas argamassas apenas com T. Nas curas SP e St, contrariamente ao que se verifica na cura H, os valores de CC aumentam, com a idade, em todas as composições, à exceção da NHL_5T+10Mk quando sujeita a cura SP.

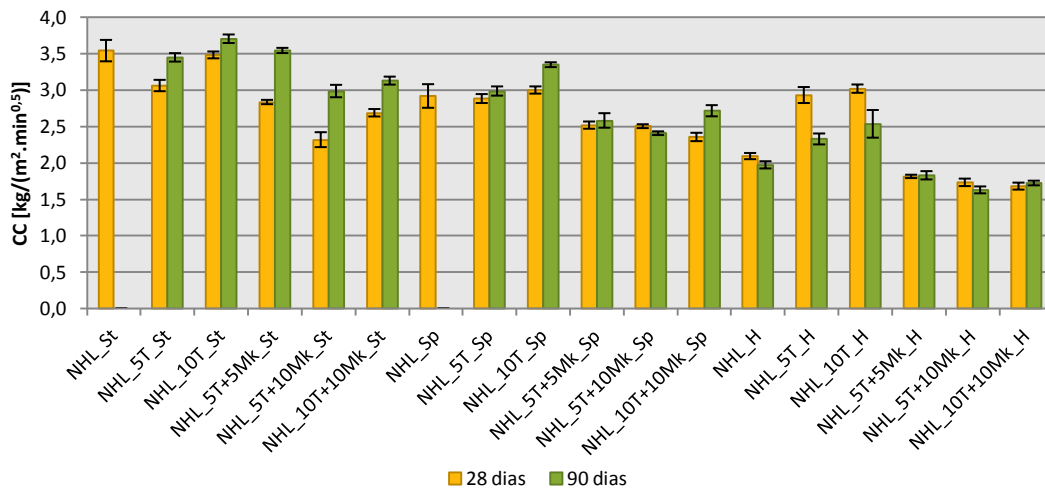


Figura 4.42 – Evolução com a idade do coeficiente de capilaridade

O VA das argamassas aos 28 dias de idade é apresentado na Figura 4.43. Na observação da figura não se observam diferenças significativas nos valores. A cura St apresenta valores superiores, quando comparados com as restantes curas numa mesma argamassa, na argamassa de referência e nas com Mk. Já nas argamassas com apenas T, a cura H, apresenta valores mais elevados. A cura

SP apresenta os VA mais baixos, à exceção da argamassa de referência e da NHL_5T+10Mk, em que a cura H conduz a valores inferiores.

Na cura H, todas as composições com apenas T e mistas (T+Mk) apresentam VA superior ao da argamassa de referência. As argamassas com apenas T apresentam valores superiores, apesar de ocorrer um ligeiro decréscimo do valor com o aumento do teor de T. Nas argamassas com Mk os valores são muito próximos nas três composições. Na cura SP, as argamassas com T em substituição de massa de cal apresentam VA muito próximos entre si e inferiores ao da argamassa de referência. Já as argamassas com Mk apresentam valores ligeiramente superiores ao da argamassa de referência, à exceção da NHL_5T+5Mk. Na cura St, à semelhança da cura SP, as argamassas com apenas T e a NHL_5T+5Mk têm VA inferiores ao da argamassa de referência, sendo que com o aumento da dosagem de T e com a adoção de Mk, VA aumenta. As argamassas com 10% de Mk apresentam valores muito próximos e superiores aos da argamassa de referência.

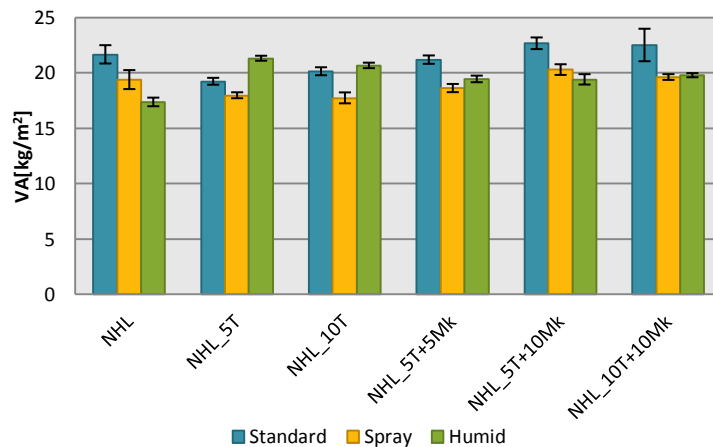


Figura 4.43 – Valor assintótico aos 28 dias

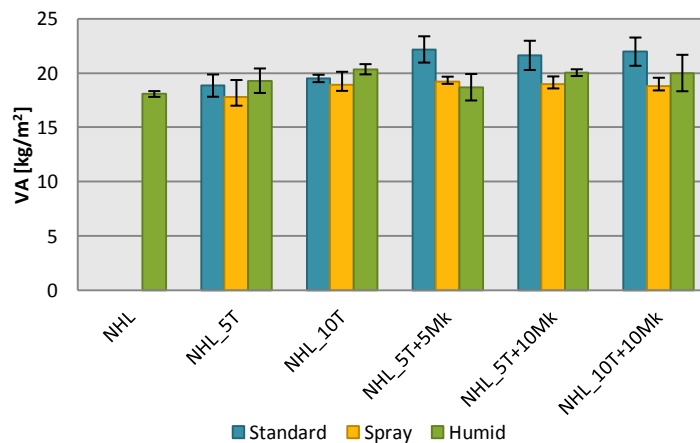


Figura 4.44 – Valor assintótico aos 90 dias

Na Figura 4.44 estão representados os resultados de VA aos 90 dias das argamassas. Aos 90 dias, à semelhança do que acontece aos 28, para as argamassas com apenas T, é na cura H que

se obtêm VA superiores. Já para argamassas com Mk, os VA mais elevados são verificados na cura St. As argamassas sujeitas a cura SP apresentam VA muito próximos e continuam a ser as que apresentam VA mais baixos, à exceção da NHL_5T+5Mk.

VA aumenta na cura H, da argamassa de referência para a com 5% de T, e com o aumento da dosagem de T. A NHL_5T+5Mk apresenta um valor muito próximo da argamassa de referência mas VA aumenta com o aumento da dosagem de Mk. Os valores das argamassas com 10% de Mk são muito próximos. Na cura St, ao contrário do que acontece aos 28 dias, a NHL_5T+5Mk apresenta um VA superior ao das argamassas com 10% de Mk.

Na *Figura 4.45* é apresentada a evolução com a idade do VA. As variações verificadas não são significativas e não se verifica qualquer tendência.

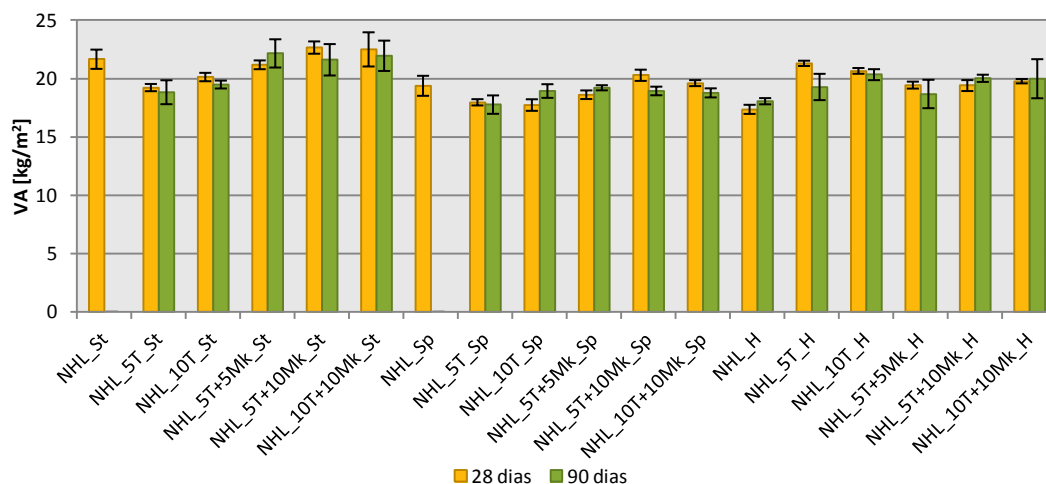


Figura 4.45 – Evolução com a idade do valor assintótico

4.4.8. Secagem

Descrição

O ensaio de secagem foi executado conforme o definido pela recomendação da RILEM (1980) e pela norma italiana NORMAL 29/88 [CRN-ICR, 1988]. Este foi realizado na sequência do ensaio de absorção capilar, com os provetes saturados, e com o intuito de estudar a quantidade de água que os provetes perdem, em função do tempo, durante as primeiras horas do processo (taxa de secagem – TS) e durante a globalidade do processo até ficarem apenas com um teor mínimo de água (índice de secagem – IS).

Procedimento

Após o término do ensaio de capilaridade colocaram-se os provetes sobre uma bancada impermeável em sala condicionada com humidade relativa de 65±5% e apenas com o topo livre. Foram feitas medições de massa de hora a hora no primeiro dia do ensaio e posteriormente de 24h em 24h até a variação de massa ser mínima. Tal ocorreu às 480h do ensaio.

Tratamento de resultados

No caso do ensaio de secagem, a quantidade de água evaporada até cada medição de massa foi calculada pelo quociente entre massa evaporada até ao instante t e a área exposta ao ar para secagem. Traçou-se a curva de secagem que relaciona a quantidade de água evaporada com o tempo decorrido. A partir do cálculo do declive do troço inicial da curva de secagem, correspondente às primeiras horas de ensaio, foi possível determinar a taxa de secagem (TS) da argamassa. Foram analisadas as curvas de secagem de cada provete e calculada a sua TS. Posteriormente calculou-se o valor médio de TS de cada argamassa e o seu desvio padrão.



Figura 4.46 – Ensaio de secagem

Em relação ao cálculo do índice de secagem (IS), inicialmente foi necessário determinar o teor em água que cada provete tinha no dia de cada medição de massa, através da *Equação 4.9*. Posteriormente calculou-se o IS por recurso à *Equação 4.10*.

$$W_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100$$

Equação 4.8

Em que,

- W_i – Teor em água [%]
- m_0 – Massa seca do provete (medida antes do início do ensaio de capilaridade) [g]
- m_i – Massa do provete no instante i [g]

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

Equação 4.9

Em que,

- IS – Índice de secagem
- t_i – Tempo decorrido i minutos depois do início do ensaio [min]
- t_{i-1} – Tempo na medição anterior à do instante i [min]

W_i	–	Teor de água do provete correspondente à medição de massa decorridos i minutos do início do ensaio [%]
W_{i-1}	–	Teor de água do provete correspondente à medição de massa anterior à do instante i [%]
t_f	–	Tempo final do ensaio [min]
W_{max}	–	Teor de água máximo do provete (corresponde ao teor de água do provete no início do ensaio) [%]

Foi determinado um IS para cada provete ensaiado e só depois foi calculado o valor médio dos três IS, de forma a obter um valor final que refletisse o comportamento da argamassa em relação ao processo de secagem a longo prazo.

Apresentação e análise de resultados

A TS e o IS são parâmetros qualitativos que permitem verificar a rapidez com que uma argamassa seca, no caso do TS no início do processo de secagem, durante as primeiras horas, e no caso do IS a nível de secagem global, durante todo o ensaio. A argamassa será mais eficiente se tiver um valor de TS elevado e um valor de IS baixo, o que significa que tanto a secagem inicial, quanto a global, serão rápidas. Os resultados de TS e IS são representados em gráficos de barras.

Nas *Figuras 4.47 e 4.48* são apresentadas as curvas de secagem correspondentes, respetivamente, aos 28 e 90 dias das argamassas.

Os resultados da taxa de secagem no ensaio aos 28 dias estão apresentados na *Figura 4.49*. Na observação da figura não é fácil identificar tendências de secagem; no entanto, as argamassas NHL_5T e NHL_5T+5Mk sujeitas a cura St são as que apresentam valores de TS mais elevados, sendo portanto as que numa fase inicial secam mais rápido. As restantes composições, quando expostas a cura SP, apresentam os maiores valores de TS (numa comparação entre curas para uma mesma composição).

Em relação às argamassas sujeitas a cura St, todas as composições apresentam TS superior ao da argamassa de referência, à exceção NHL_5T+10Mk. Nas argamassas com apenas T em substituição da cal, TS diminui com o aumento da dosagem de T. Nas argamassas com Mk, TS também diminui com o aumento da dosagem de Mk. No entanto, aumenta com o aumento do teor de T. Na cura SP, para uma substituição de cal por 5% de T, TS é inferior à argamassa de referência; no entanto, TS aumenta com o aumento do teor de T, registando um valor superior ao da argamassa de referência. Entre as argamassas com Mk, os valores de TS nas três composições praticamente não variam e são ligeiramente superiores aos da argamassa de referência. No caso da cura H, a argamassa NHL_5T apresenta um TS superior ao da argamassa de referência; no entanto, TS diminui com o aumento do teor de T, registando um valor um pouco inferior ao da argamassa de referência. Nas argamassas com Mk, TS diminui à medida que aumentam os teores de T e Mk.

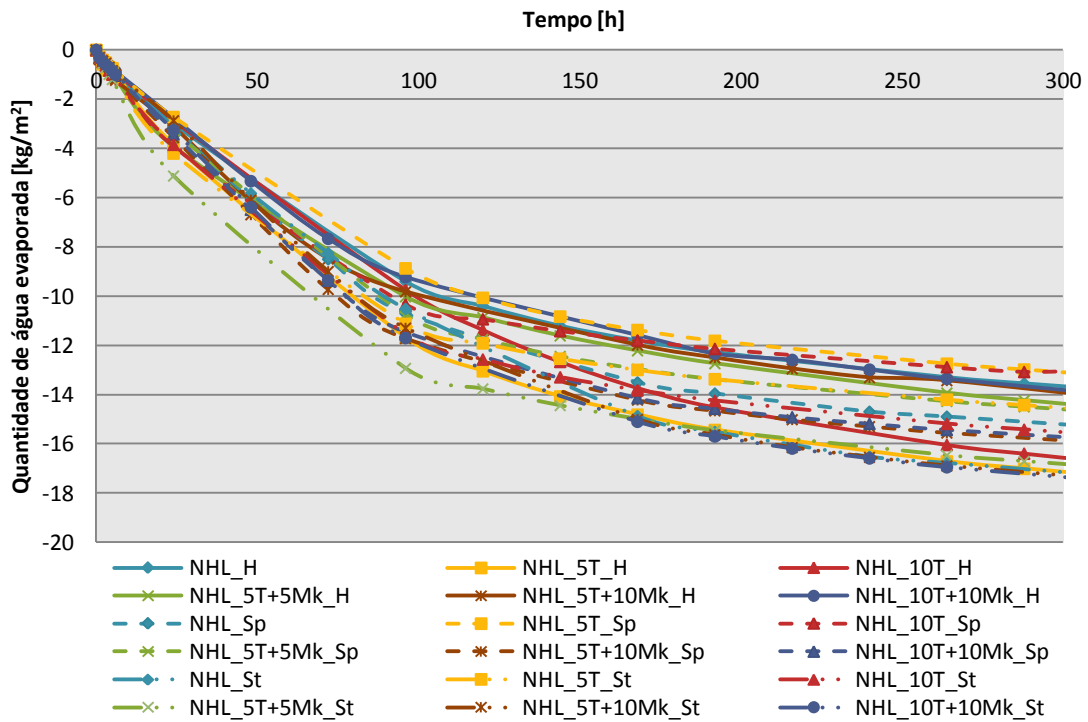


Figura 4.47 – Curva de secagem aos 28 dias

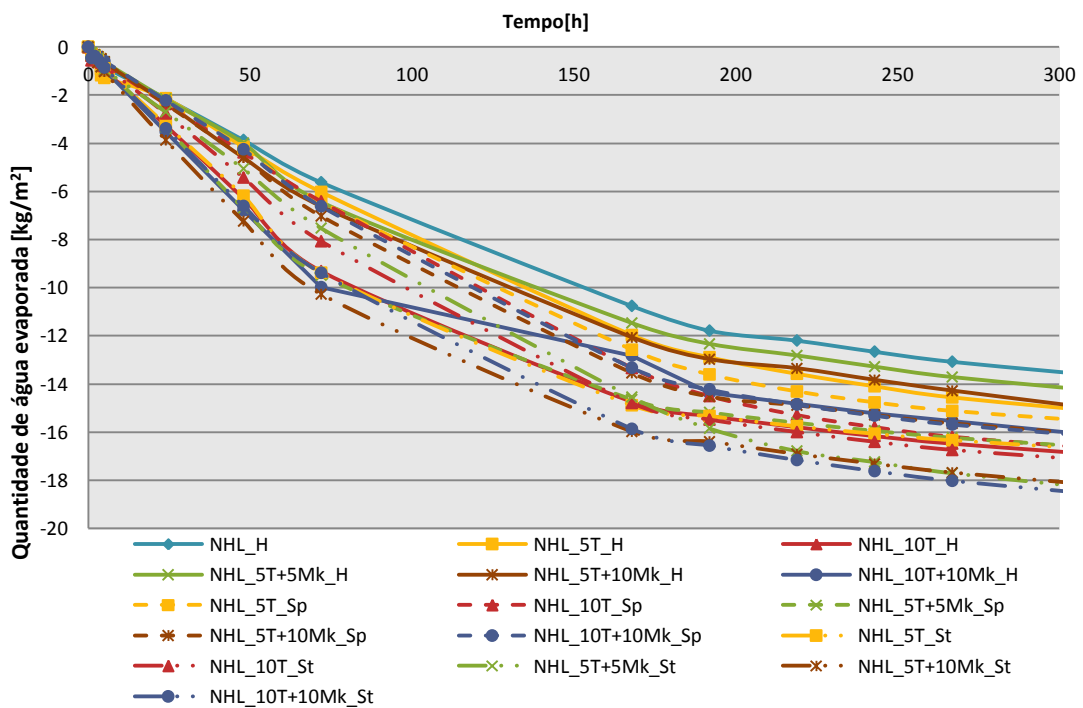


Figura 4.48 – Curva de secagem aos 90 dias

Na Figura 4.50 são apresentados os resultados da TS aos 90 dias de idade das argamassas. Verifica-se uma inversão das tendências com a evolução da idade; em alguns casos as tendências são contrárias às observadas para os 28 dias das argamassas. As diferenças de valores entre diferentes condições de cura para uma mesma argamassa apresentam variações

significativas. A NHL_5T+10Mk_St regista o valor superior de TS, sendo portanto a argamassa mais rápida a secar no início do processo.

Em relação à cura H, com a substituição de cal por 5% de T, e comparativamente à argamassa de referência, TS mantém-se, mas com o aumento da dosagem de T, TS aumenta significativamente. A argamassa com 5% de Mk apresenta valores bastante semelhantes aos da argamassa de referência. Com o aumento dos teores de T e Mk, TS aumenta, mas o aumento é mais significativo no caso da argamassa com 10% de T e 10% de Mk. Aos 28 dias, TS diminui nas argamassas apenas com T e nas com Mk, com o aumento dos teores de T e Mk; já aos 90 dias, TS aumenta. No caso da cura SP, contrariamente ao que ocorre aos 28 dias, verifica-se que a NHL_5T+5Mk apresenta o maior valor de TS (dentro das argamassas sujeitas a cura SP), ocorrendo uma diminuição significativa de TS com o aumento do teor de Mk. Na cura St, NHL_5T+5Mk deixa de ser a argamassa com TS superior, e portanto a mais eficiente neste parâmetro, e com o aumento do teor de Mk, TS aumenta significativamente, sendo que TS diminui com o aumento da dosagem de T.

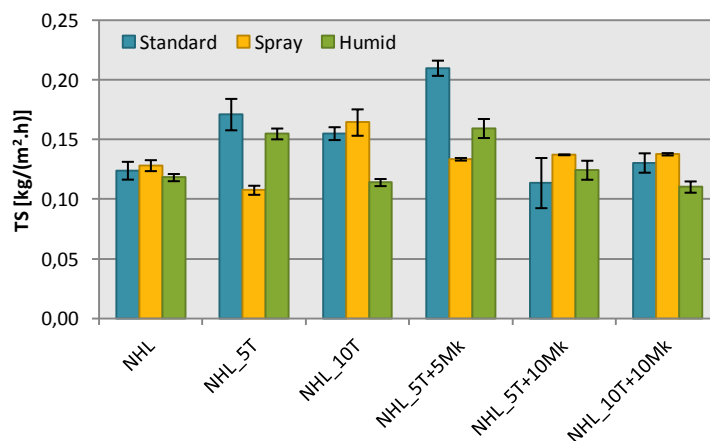


Figura 4.49 – Taxa de secagem aos 28 dias

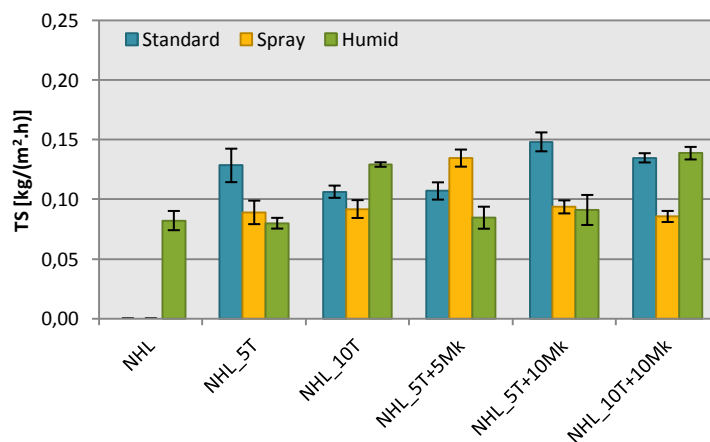


Figura 4.50 – Taxa de secagem aos 90 dias

Na *Figura 4.51* é apresentado o gráfico referente à evolução com a idade da tava de secagem. Na grande maioria das composições de todas as curas estudadas verifica-se o decréscimo significativo do valor de TS dos 28 para os 90 dias.

Na argamassa NHL_5T, apesar de TS ter diminuído em todas as curas com a evolução do tempo, na cura H essa diminuição é mais expressiva; daí da *Figura 4.49* para a *Figura 4.50* se verificar a perda de influência da cura H, apresentando um valor até inferior ao da cura SP, que na primeira idade estudada apresentava o TS inferior. Em relação à NHL_10T, nas curas St e SP verifica-se a diminuição de TS (mais significativa na cura SP), ao contrário do verificado na cura H; daí aos 28 dias a argamassa sujeita a cura SP apresentar TS superior e a da cura H, TS inferior, e aos 90 dias esses resultados terem sido invertidos. A argamassa NHL_5T+5Mk sujeita a cura St apresenta o valor superior de TS, aos 28 dias; já na sujeita a cura SP o valor é inferior. Aos 90 dias, é a argamassa sujeita a cura SP que apresenta TS superior. Tal verifica-se devido à diminuição muito significativa de TS nas curas St e H, ao contrário da cura SP, em que TS permanece com um valor muito próximo com a evolução da idade.

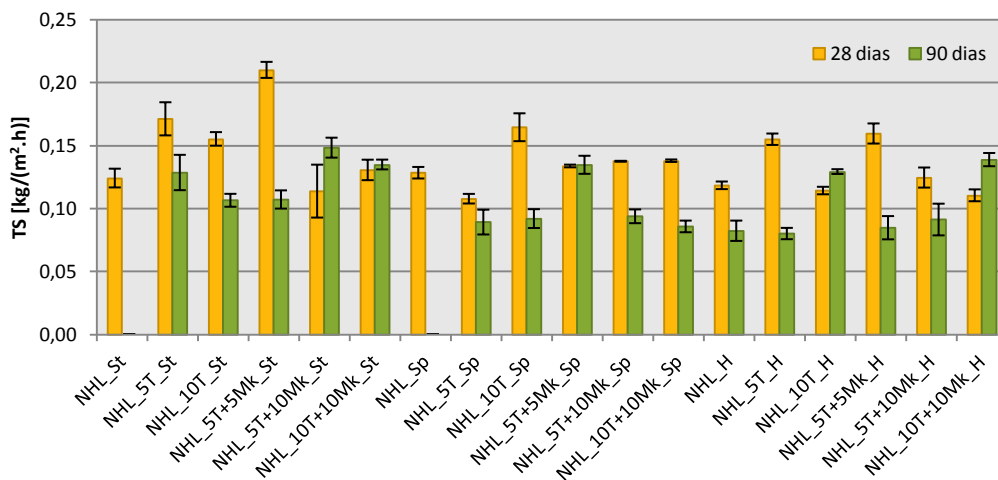


Figura 4.51 – Evolução com a idade da taxa de secagem

No caso da NHL_5T+10Mk, verifica-se dos 28 para os 90 dias que o valor de TS na argamassa sujeita a cura St, anteriormente inferior entre as três curas, passa a ter um valor significativamente superior de TS. Tal é verificado devido à diminuição de TS nas curas H e SP e ao seu aumento na cura St. Finalmente em relação à argamassa NHL_10T+10Mk, aos 28 dias, apresenta o valor superior de TS e aos 90 dias, o valor inferior. Tal verifica-se porque nas argamassas sujeitas a cura H e St, TS aumenta, ao contrário do que ocorre no caso da argamassa sujeita a cura SP.

Os resultados referentes ao índice de secagem (IS) aos 28 dias são apresentados na *Figura 4.52*. Neste caso verifica-se que os valores para uma mesma argamassa entre os três tipos de cura não variam muito. É possível reparar que as argamassas com 10% de Mk e de referência, sobretudo a sujeita a cura SP, são as que demoram mais tempo a secar na globalidade do processo.

As argamassas com apenas resíduo cerâmico, sujeitas a qualquer uma das curas, mantêm valores de IS semelhantes com o aumento do teor de T e inferiores aos das respectivas argamassas de referência, pelo que o seu processo de secagem é mais rápido. Com a adoção de 5% de Mk nas curas St e SP, e em comparação com a argamassa NHL_5T, IS diminui, e na cura H, IS aumenta. Com o aumento do teor de Mk, na NHL_5T+10Mk, em qualquer uma das condições de cura estudadas, IS apresenta valores bastante superiores aos da NHL_5T+5Mk. Com o aumento do teor de T, nas curas St e SP, IS diminui; já na cura H, IS aumenta.

Na *Figura 4.53* são apresentados os resultados do IS aos 90 dias de idade das argamassas. Nesta idade, não se verificam diferenças expressivas nos valores de IS entre as diferentes composições nem, para uma mesma composição, entre as diferentes condições de cura. As argamassas com 10% de Mk, aos 90 dias, não apresentam valores mais elevados em comparação com as restantes composições, ao contrário do que os resultados dos 28 dias demonstram.

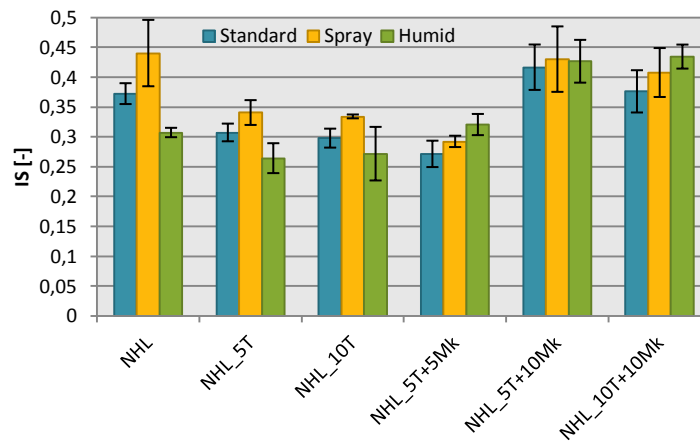


Figura 4.52 – Índice de secagem aos 28 dias

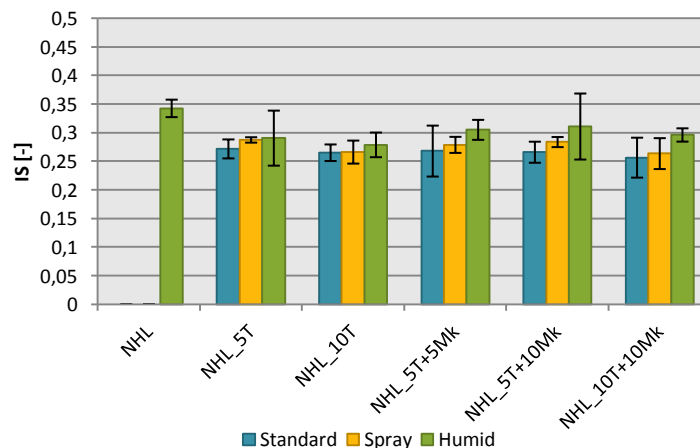


Figura 4.53 – Índice de secagem aos 90 dias

Na cura St, IS mantém um valor praticamente constante entre todas as composições. Na cura SP mantêm-se as tendências descritas no caso dos 28 dias de idade, mas as variações não são tão

significativas. No caso da cura H, nas argamassas apenas com T verifica-se, com o aumento da dosagem de T, uma ligeira diminuição de IS. Nas argamassas com Mk, com o aumento da dosagem de Mk, IS mantém um valor muito próximo entre as argamassas NHL_5T+5Mk e NHL_5T+10Mk. Já com o aumento da dosagem de T, IS diminui.

Na *Figura 4.54* estão representados os resultados de IS aos 28 e aos 90 dias de idade das argamassas. Em todas as composições sujeitas a curas SP e St os valores de IS diminuem com a evolução com o tempo. Na cura H, as argamassas de referência e apenas com substituição de cal por T apresentam um aumento de IS. Já nas argamassas com Mk, à semelhança das restantes condições de cura, IS diminui.

Tal como foi referido anteriormente, as argamassas com 10% de Mk apresentam, aos 90 dias, valores de IS muito próximos aos das restantes composições, o que não era verificado aos 28 dias. Na análise comparativa entre os 28 e 90 dias verifica-se que em tais argamassas ocorre uma diminuição significativa de IS, registando aos 90 dias valores muito similares aos das restantes argamassas.

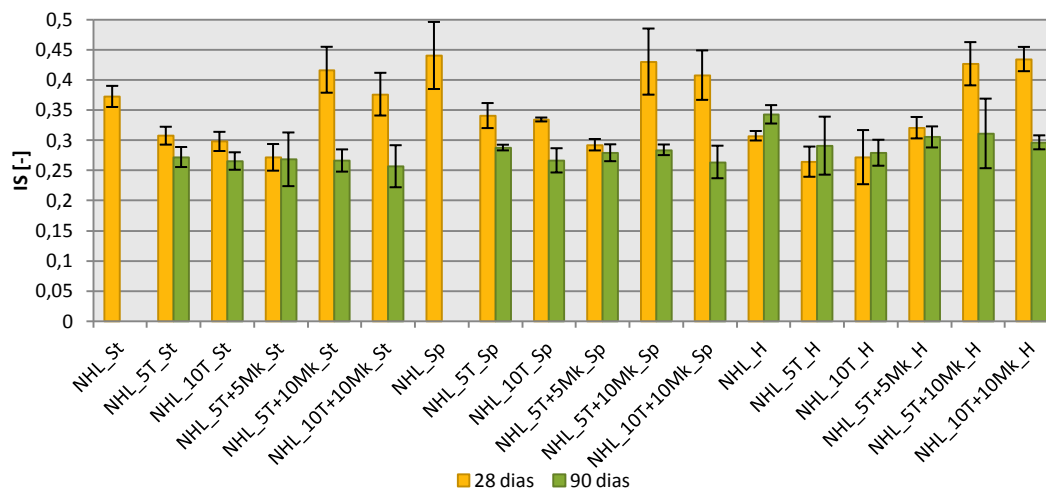


Figura 4.54 – Taxa de secagem: evolução com a idade

4.4.9. Absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten)

Descrição

O ensaio dos tubos de Karsten foi realizado com o intuito de avaliar a capacidade das argamassas absorverem água líquida sob pressão. Para tal foi contabilizado o volume de água absorvida pela superfície da argamassa, numa determinada área e durante um período de tempo pré-definido. Este ensaio foi realizado no revestimento dos tijolos, colocados na posição vertical, com três tubos de Karsten distribuídos por cada tijolo, sendo o ensaio realizado quase em simultâneo nos três tubos.

Procedimento

Na preparação dos tubos de Karsten, antes do ensaio, foram medidos os diâmetros interiores das aberturas inferiores e comprimida plasticina a envolver a abertura, cuidadosamente para não a obstruir. Os tubos foram comprimidos contra o revestimento dos tijolos e foi colocada mais plasticina em redor do diâmetro exterior da abertura, de forma a garantir a estanquicidade dos tubos e a sua aderência ao reboco.

No início do ensaio, colocou-se água nos tubos até à marca $0,0 \text{ cm}^3$, correspondente a um volume de 4 cm^3 . Posteriormente, mediu-se o volume de água dos tubos aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos, a contar a partir da colocação de água no tubo. Acrescentou-se 4 cm^3 de água aos tubos sempre que a água no tubo atingiu a marca de $4,0 \text{ cm}^3$.

Observações

Antes do início do ensaio dos tubos de Karsten, o reboco de argamassa NHL_10T+10Mk destacou-se integralmente do tijolo (Figura 4.56). Nessas condições realizou-se o ensaio com o reboco encostado ao respetivo suporte; no entanto os resultados não devem ser considerados fidedignos pois não se considera a influência do suporte na análise da propriedade de absorção de água.



Figura 4.55 – Ensaio dos tubos de Karsten

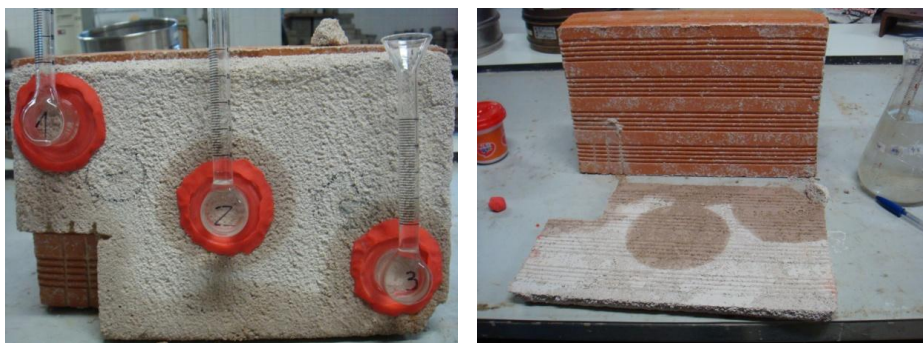


Figura 4.56 – Destaque total da argamassa NHL_10T+10Mk

No caso da argamassa NHL_10T também se destacou parcialmente do suporte (Figura 4.57), pelo que apenas foi possível realizar o ensaio com dois tubos de Karsten.



Figura 4.57 – Destaque parcial da argamassa NHL_10T

No caso da argamassa NHL_5T+10Mk um tubo caiu assim que foi colocada água no seu interior. Fez-se o ensaio com os tubos que se mantiveram fixos à argamassa e só posteriormente na posição do outro tubo que caiu. Os resultados foram muito dispersos em relação aos valores resultantes dos dois tubos ensaiados previamente. Assim repetiu-se o ensaio mais tarde, após a secagem do revestimento, desta vez utilizando os três tubos. No entanto, os resultados na repetição foram de novo bastante dispersos, sendo que o tubo intermédio absorveu água mais rapidamente.

Tratamento de resultados

Em relação aos resultados do ensaio dos tubos de Karsten foram analisados dois parâmetros: o valor médio da quantidade de água absorvida pelos três tubos, em função do tempo decorrido, e também o coeficiente de absorção de água correspondente a cada leitura.

Primeiramente, para cada um dos tubos, foi calculada a quantidade de água que foi absorvida até cada leitura aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos. Para tal considerou-se a quantidade de água absorvida até à leitura anterior somada à quantidade de água absorvida nesse intervalo. No entanto, nos casos em que foi adicionada mais água nesse intervalo foi necessário contabilizar a quantidade de água adicionada (4cm^3) e o número de vezes que foi adicionada até essa leitura, somando-lhe ainda a quantidade de água registada na leitura. A referida contabilização foi feita para cada leitura até à dos 60 minutos, que corresponde ao valor máximo de água absorvida pela argamassa através desse tubo. Para cada leitura foi calculado o valor médio entre os três tubos e traçada graficamente a quantidade de água absorvida em cada argamassa, em função do tempo em minutos.

O coeficiente de absorção para cada leitura do ensaio foi calculado por recurso à *Equação 4.10* e para cada tubo. Posteriormente foi feita a média aritmética do coeficiente entre os três tubos por cada argamassa. Os coeficientes de absorção das diversas argamassas foram registados num gráfico de barras.

$$C_{\text{absorção}}^t = \frac{m_{\text{abs}} \times 10^{-3}}{\frac{\pi \times d^2}{4} \times 10^{-6} \times \sqrt{t}}$$

Equação 4.10

Em que,

- $C_{\text{absorção}}$ – Coeficiente de absorção na leitura ao tempo t [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$]
 m_{abs} – Massa de água absorvida [g]
 d – Valor médio do diâmetro da abertura inferior do tubo de Karsten [mm]
 t – Intervalo de tempo correspondente ao coeficiente calculado

Apresentação e análise de resultados

As Figuras 4.58 e 4.59 representam, respetivamente, a quantidade máxima de água absorvida e as curvas de absorção de água durante os 60 minutos do ensaio. Pela observação de ambas as figuras é possível concluir que as argamassas com Mk são as que absorvem maior quantidade de água e mais rapidamente, já a argamassa de referência e as com apenas T apresentam um tempo de absorção inicial muito semelhante e a quantidade de água total absorvida também é bastante semelhante (aproximadamente 16cm^3 de água).

Entre as argamassas com Mk, destaca-se a NHL_5T+10Mk que absorve maior quantidade de água (cerca de 20cm^3 de água) e cuja absorção inicial decorreu mais rapidamente. As restantes argamassas com Mk apresentam uma absorção inicial muito semelhante; no entanto, a NHL_10T+10Mk, no fim do ensaio, absorveu menor volume de água. Como já foi referido, não é possível saber até que ponto o comportamento da argamassa NHL_10T+10Mk é fidedigno nem em que medida os resultados poderiam ser diferentes caso o revestimento do tijolo não se tivesse destacado. Dias (2013) e Jamú (2013) caracterizaram o tijolo e verificaram que, diretamente através de tubo de Karsten, apresenta uma absorção muito reduzida de água. No entanto, é expectável que, sendo o tijolo um material poroso, influencie de alguma forma os resultados.

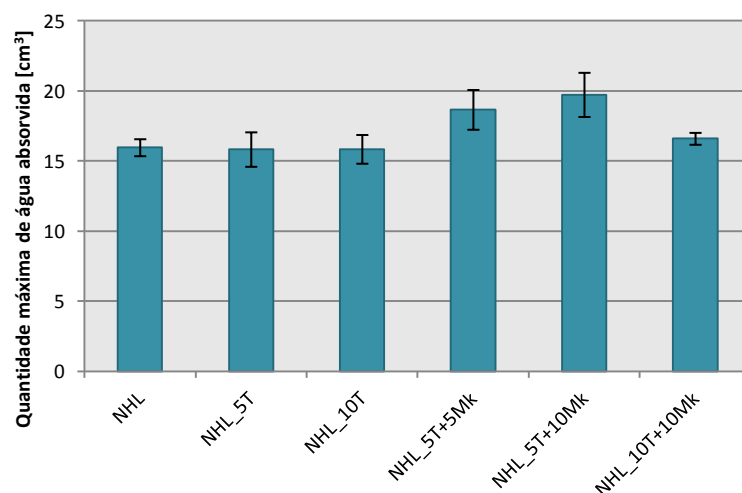


Figura 4.58 – Quantidade máxima de água absorvida em 60 minutos

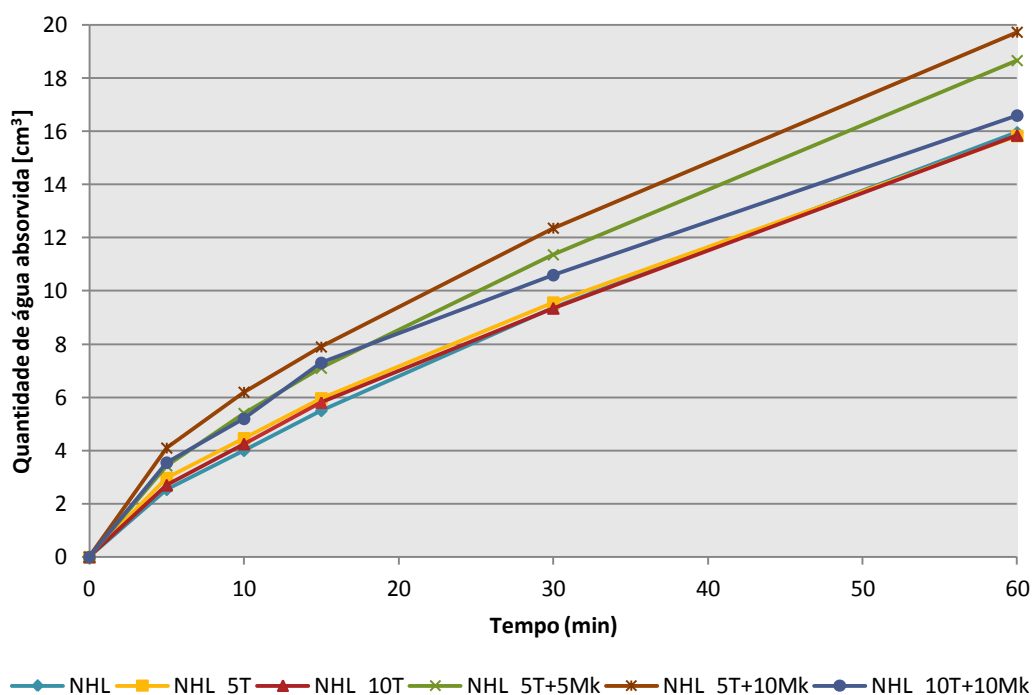


Figura 4.59 – Quantidade de água absorvida ao longo do ensaio

Pela análise dos desvios padrão em relação à quantidade média de água absorvida até aos 60 minutos de ensaio verifica-se que entre os três tubos a atuar em simultâneo, o volume de água absorvida apresenta alguma dispersão. Tal foi particularmente verificado na argamassa NHL_5T+10Mk, tal como descrito nas observações, em que o ensaio foi realizado duas vezes e em ambas a quantidade de água absorvida no tubo intermédio foi bastante superior. Como no primeiro ensaio esse tubo tinha sido analisado sozinho e só posteriormente em conjunto com os restantes, associou-se a diferença de resultados à provável influência de ter três tubos a atuar numa área pequena, ou nesse caso ao facto de não existir essa influência. No entanto na repetição do ensaio, já com os três tubos a atuar em simultâneo, a dispersão manteve-se. Assim, assume-se que a absorção de um volume superior poderá estar relacionada com microfissuras na área onde foi fixado o tubo intermédio.

Pela análise da *Figura 4.59* é possível ainda deduzir o tempo médio no qual decorreu a absorção dos primeiros 4cm^3 de água do tubo. A argamassa NHL_5T+10Mk foi a que absorveu, em média, mais rapidamente 4cm^3 de água, logo por volta dos 5 minutos de ensaio. As argamassas de referência e com apenas T só acabaram de absorver os primeiros 4cm^3 de água ao fim do dobro deste período de tempo.

Na *Figura 4.60* são apresentados os coeficientes de absorção de água para cada momento t em que foram realizadas medições. O coeficiente corresponde basicamente ao declive de um segmento de reta entre o momento inicial do ensaio (0 minutos) e a quantidade de água absorvida no momento t em cálculo, sendo que um maior coeficiente corresponderá a uma absorção mais rápida. Em relação aos coeficientes de absorção aos 5 minutos, a argamassa NHL_5T+10Mk apresenta o

coeficiente superior, como era expectável, visto ser a que absorve água mais rapidamente. A argamassa de referência é a que tem um coeficiente mais baixo, uma vez que, tal como é verificado na *Figura 4.59*, apresenta a absorção mais lenta. No caso das argamassas com apenas T, a argamassa NHL_5T apresenta coeficiente superior.

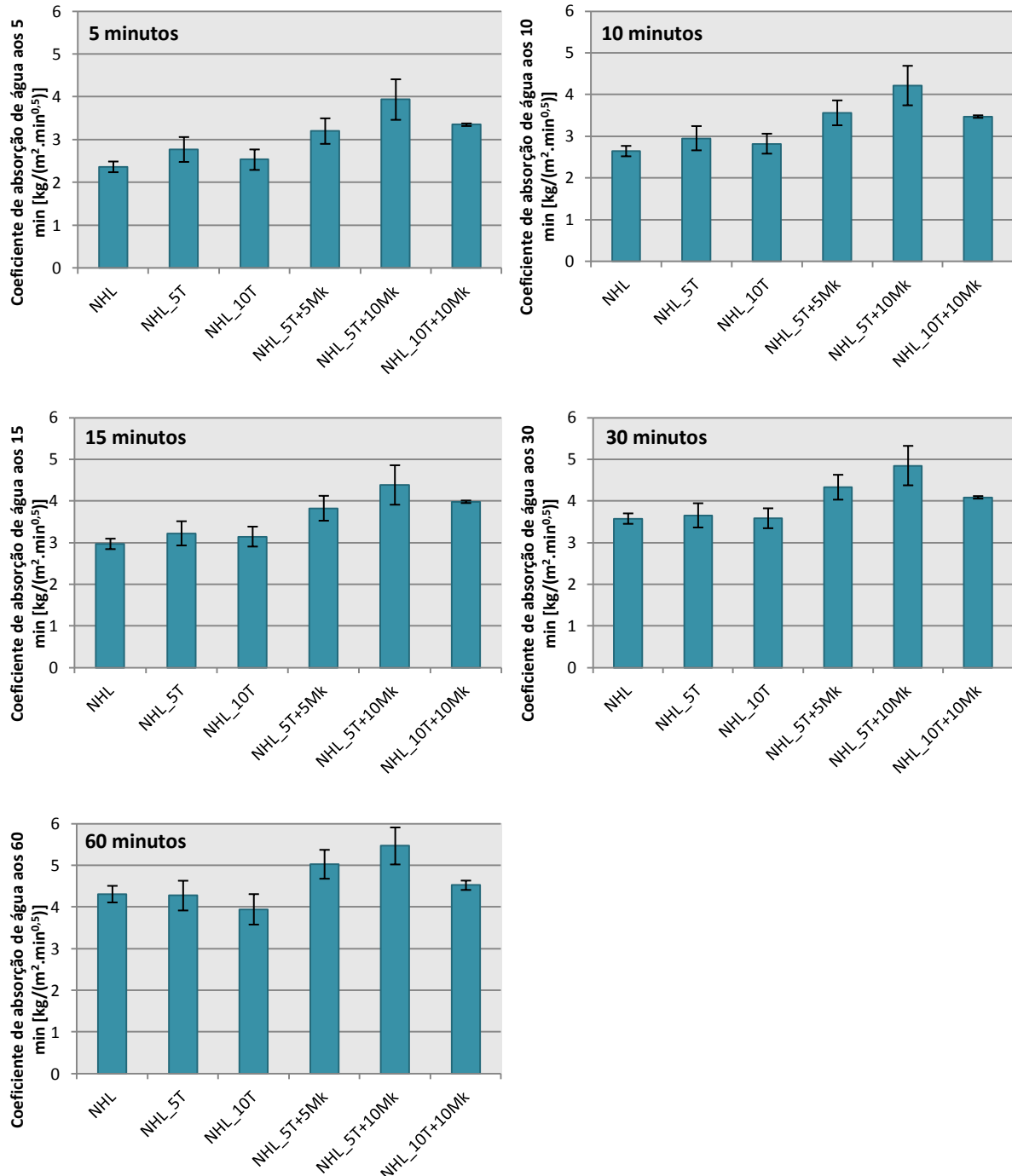


Figura 4.60 – Coeficientes de absorção de água após 5, 10, 15, 30 e 60 minutos de ensaio

As tendências entre os momentos de cálculo do coeficiente na generalidade mantêm-se, verificando-se apenas o aumento dos seus valores. Entre as argamassas NHL_5T+5Mk e NHL_10T+10Mk verifica-se que a tendência dos coeficientes vai variando de acordo com o verificado nas curvas entre os 5 e os 15 minutos; no entanto, como a partir dos 15 minutos a velocidade de absorção da última argamassa referida diminui, os coeficientes aos 30 e 60 minutos são mais baixos. Por outro lado, as argamassas sem Mk apresentam aos 30 minutos velocidades de absorção muito próximas, contrariamente ao verificado inicialmente, e aos 60 minutos a absorção de água é mais rápida na argamassa de referência e mais lenta na NHL_10T.

4.4.10. Resistência ao ataque por sulfatos

Descrição

O ensaio de resistência aos sulfatos foi realizado com base no referido na NP EN 12370:2001 [IPQ, 2001]. As metades de provetes prismáticos foram submetidas a vinte ciclos de duas horas de imersão numa solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4) (ou até à sua destruição), com concentração de 3,09%, sendo que nos intervalos entre ciclos os provetes permaneceram em estufa à temperatura de $105\pm 5^\circ\text{C}$. A concentração da solução corresponde a metade da preconizada na norma referida, uma vez que esta foi definida para pedra natural cuja resistência aos sulfatos pode ser bastante superior à de uma argamassa de cal hidráulica natural.

Neste processo, antes da imersão dos provetes, em cada ciclo, foi medida a sua massa. Primeiramente verificou-se o aumento de massa devido aos sais que cristalizam nos poros dos provetes. Posteriormente, os provetes começaram a expandir, fissurar, fendilhar e finalmente a degradar-se perdendo sucessivamente massa. Em alguns casos deu-se mesmo a rotura. Em outros casos, os provetes mantiveram-se íntegros durante a maioria dos ciclos mas evidenciaram desagregação nas faces e arestas.

Procedimento

Previamente ao início do ensaio, os provetes foram colocados na estufa a $105^\circ\pm 5^\circ\text{C}$ até atingirem uma massa constante e a solução de sulfato de sódio foi preparada (Figura 4.61). No início do ensaio foram medidas as massas dos provetes após o seu arrefecimento. Os provetes foram imersos na solução, tendo o cuidado de os colocar devidamente afastados entre eles e das paredes da caixa onde decorreu o ensaio. Foram colocados sobre um estrado plástico para garantir que sua base estivesse em contacto com a solução (Figura 4.62).

Os provetes ficaram durante 2 horas imersos, após as quais foram inseridos novamente na estufa a $105\pm 5^\circ\text{C}$. Esse procedimento repetiu-se nos 20 ciclos do ensaio. No entanto, sempre que os provetes se desagregaram, manteve-se em ensaio a parte de maior massa do provete e o resto foi retirado do ensaio e exposto às condições atmosféricas no interior do laboratório.

Observações

Durante a execução do ensaio foi possível observar diferentes comportamentos entre as diferentes composições de argamassas e também diferentes comportamentos entre as mesmas composições mas em condições de cura diferentes.

Verificou-se que em termos de curas, as argamassas da cura húmida começaram a apresentar sinais de expansão e degradação mais cedo, nomeadamente a partir ciclo 4. Os provetes NHL_5T+10T_H foram os primeiros a fendilhar e, conseqüentemente, os primeiros a atingir a rotura (*Figura 4.63*), seguidos dos NHL_10T+10Mk_H. Salienta-se o facto de serem estes os provetes com maior teor em metacaulino.

Também nas restantes curas as primeiras argamassas a evidenciar degradação foram as que tinham Mk na sua composição, sendo que as que tinham 5% de resíduo cerâmico e 10% de Mk foram piores nesta análise.



Figura 4.61 – Preparação da solução de Na_2SO_4



Figura 4.62 – Provetes imersos na solução de Na_2SO_4

No entanto, as argamassas com apenas resíduo cerâmico em substituição de cal mantiveram a sua integridade durante a maior parte dos ciclos, apresentando no máximo alguma desagregação nas arestas e faces. Verificou-se até, na cura St, que os provetes dessas composições apresentaram maior resistência aos sulfatos do que os da argamassa de referência.

Verificou-se ainda que as argamassas da cura SP foram as que apresentaram melhores características de resistência ao ataque por sulfatos e a sua degradação foi retardada face à das argamassas das restantes curas.

No ensaio aos 90 dias de idade das argamassas, os provetes com metacaulino foram também os que apresentaram maior degradação; no entanto essa degradação ocorreu a ciclo mais tardio em relação ao ensaio aos 28 dias e, no geral, as argamassas não se degradaram tanto quanto o verificado aos 28 dias nas mesmas composições/curas. Verificou-se ainda para as diversas composições, quando sujeitas a cura SP, que os provetes se mantiveram íntegros e sem apresentar qualquer degradação quase até ao fim do ensaio.

A secagem final dos provetes após a finalização do ensaio e das partes dos provetes que se desagregaram foi lenta, devido a ter ocorrido em laboratório, exposta às suas condições térmicas e de humidade relativa. Os sais migraram para a superfície dos provetes e cristalizaram, simulando assim eflorescências (*Figura 4.64*). Na *Figura 4.65* estão representadas provetes de todas as composições, à exceção da argamassa de referência uma vez que não existiam provetes para ensaio a esta idade, e de todas as condições de cura, ordenados pelas curas H, SP e St. As imagens correspondem ao nono ciclo do ensaio de resistência aos sulfatos realizado aos 90 dias de idade das argamassas. Foi representado o ciclo 9 por ser o ciclo em que começaram a ser mais evidentes as fissuras e fendas nas argamassas, principalmente nas com Mk e quando sujeitas a cura H e St.



Figura 4.63 – Evolução de degradação dos provetes da NHL_5T+10Mk_H



Figura 4.64 – Eflorescências ilustrando o elevado teor de sais da contaminação dos provetes

Tratamento de resultados

No início do ensaio de resistência aos sulfatos, a massa dos provetes aumentou de ciclo para ciclo. Posteriormente, quando se começaram a degradar, estes foram perdendo massa. Desta forma, foram calculadas as variações de massa do provete em cada ciclo face à sua massa inicial. Para tal

foi aplicada a *Equação 4.11*. Foram ainda calculados os valores médios entre os valores de variação de massa de cada três provetes representativos de uma argamassa e cura, em cada ciclo.

$$V.M. = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100$$

Equação 4.11

Em que,

- V.M. – Variação de massa [%]
- m_i – Massa do provete no ciclo i [g]
- m_0 – Massa inicial do provete (ciclo 0) [g]

Para cada argamassa foi traçada graficamente a variação de massa em função do ciclo, permitindo constatar os ganhos e as perdas de massa desde o início do ensaio até ao seu término. Foram, para tal, utilizados os valores médios de variação de massa.

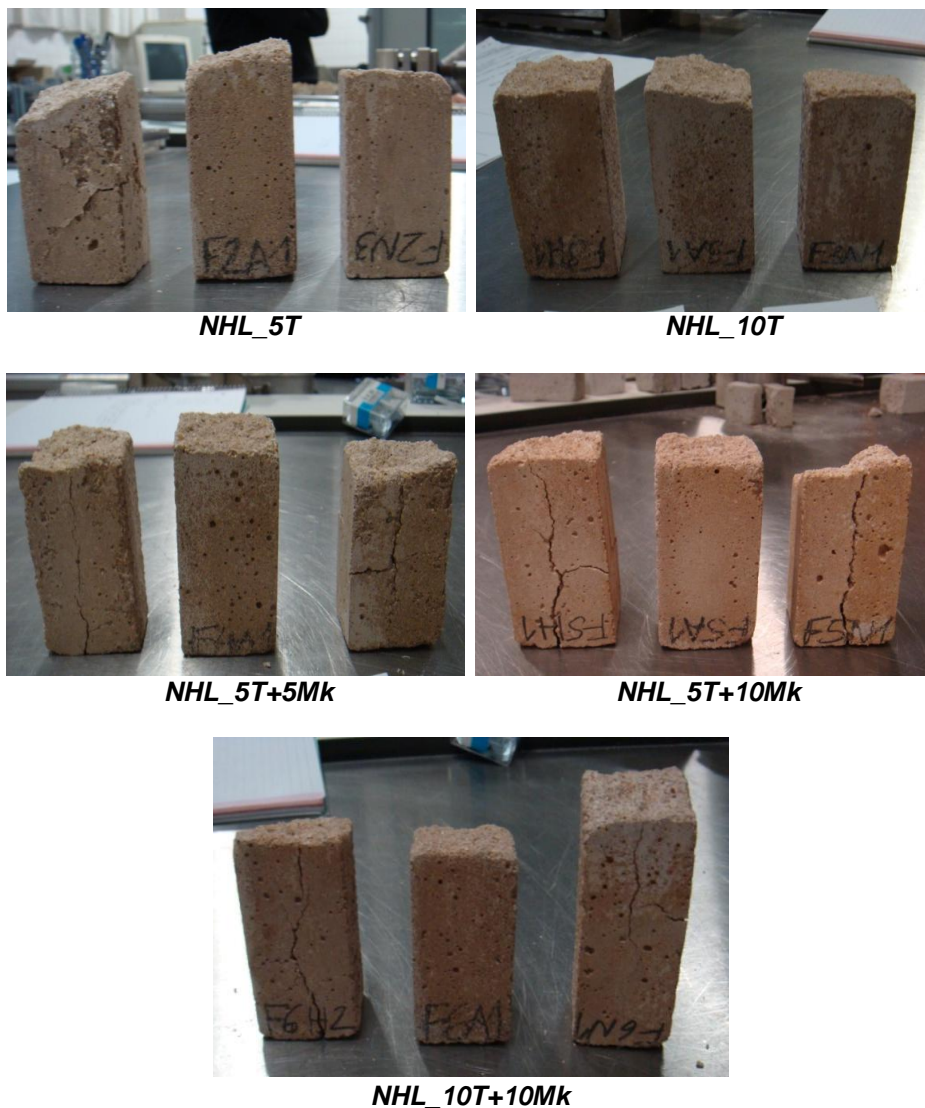


Figura 4.65 – Ciclo 9 do ensaio de resistência aos sulfatos aos 90 dias de idade

Apresentação e análise de resultados

As variações de massa ocorridas no ensaio realizado aos 28 dias das argamassas, nas três condições de cura estudadas, estão representadas na *Figura 4.66*. Assim, uma mesma cor corresponde a uma mesma composição e para as diferenciar, no caso da cura H a linha é contínua, na cura SP a representação é feita a tracejado e na cura St a representação é feita em traço-dois pontos (à semelhança da apresentação dos resultados de capilaridade e secagem). Os valores positivos de variação de massa correspondem aos ganhos de massa que as argamassas sofrem. Em relação aos valores negativos, estes correspondem a perdas de massa; uma perda de massa de 100% equivale à degradação total da argamassa.

As argamassas que apresentam melhores resultados são a de referência e a NHL_5T sujeitas à cura SP, pois são as que na globalidade do ensaio apresentam menor variação de massa, não sendo verificadas grandes perdas na conclusão do ensaio. A NHL_5T+10Mk_H é a argamassa que apresenta a maior e mais rápida perda de massa, começando logo entre o quarto e o quinto ciclo com uma perda de massa brusca, aumentando até à degradação total dos provetes ao décimo-primeiro ciclo. Na *Figura 4.66* é visível a tendência de as argamassas com Mk perderem grande parte da sua massa, ao contrário do que ocorre com as argamassas com apenas T ou com as de referência, à exceção do verificado no caso da NHL_St.

Até ao quarto ciclo verifica-se a expansão de todas as argamassas, em qualquer uma das curas estudadas. A NHL_5T+10Mk e a NHL_5T+5Mk expostas à cura H foram as argamassas que sofreram maior ganho de massa.

Na *Figura 4.67* estão representadas as variações de massa das argamassas, aos 28 dias de idade, mas separadas por curas. Na cura H, as argamassas com Mk apresentam uma perda de massa significativa logo a partir dos primeiros ciclos, ao contrário do verificado para a argamassa de referência e para as com apenas T em substituição de cal. A NHL_5T+10Mk, tal como já foi referido, é a mais rápida a começar a perder massa e a desagregar-se. A NHL10T+10Mk desagrega totalmente ao décimo-oitavo ciclo e quanto à NHL_5T+5Mk, os provetes ficam ao vigésimo ciclo com uma massa média inferior a 20%. A argamassa de referência, ainda da cura H, é a que apresenta menor variação de massa durante a maioria dos ciclos; no entanto no vigésimo ciclo perde cerca de 15% da sua massa. Já a NHL_5T sujeita à mesma cura apresenta uma perda de massa sensivelmente constante a partir do décimo-segundo ciclo e no vigésimo ciclo apresenta uma perda total de cerca de 15% da sua massa.

Na cura SP, e apesar de comparativamente às restantes condições de cura as argamassas com Mk também apresentarem uma grande perda de massa, o valor máximo desta perda é de cerca de 65% e corresponde à NHL_5T+10Mk. A argamassa de referência e a com 5% de T praticamente não perdem massa. Já a composição com 10% de T até ao décimo-oitavo ciclo praticamente não perde massa, mas entre o décimo-oitavo e o décimo-nono ciclos tem uma perda de cerca de 15%.

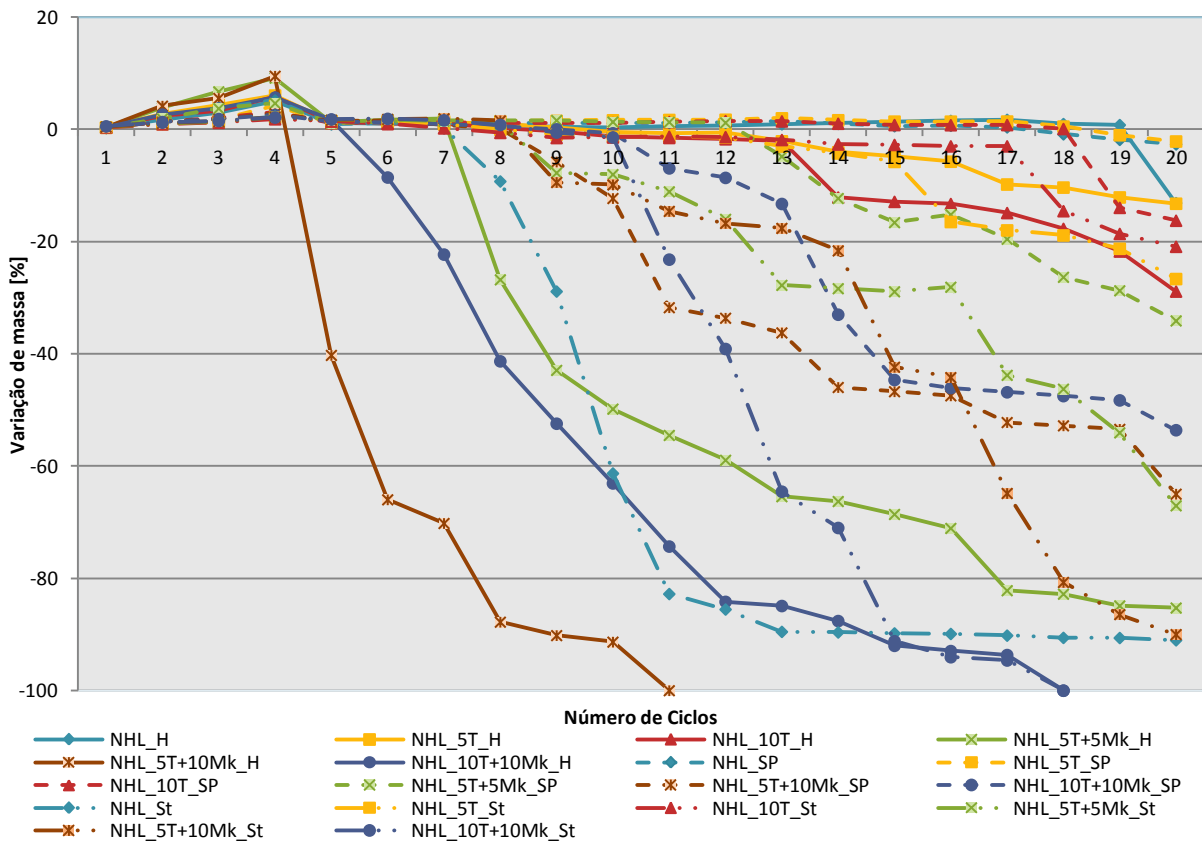


Figura 4.66 – Resistência ao ataque por sulfatos aos 28 dias

Em relação à cura St, a argamassa de referência apresenta, a partir do sétimo ciclo, um decréscimo brusco da sua massa, que atinge cerca dos 90% de perda ao décimo-terceiro ciclo; a partir deste ciclo a argamassa se mantém com uma perda de massa constante de cerca de 10%. Ainda em relação à cura St, a NHL_10T+10Mk também apresenta uma perda de massa significativa a partir do décimo ciclo, extinguindo-se ao décimo-oitavo ciclo. Já a NHL_5T+10Mk no fim do ensaio fica apenas com 10% de massa. Neste caso, as argamassas com apenas T em substituição de Mk têm uma variação de massa pouco significativa até cerca do décimo-quinto/décimo-sétimo ciclos, a partir dos quais se dá uma perda de massa mais significativa.

A expansão das argamassas sujeitas à cura H é mais expressiva, sendo que a NHL_5T+10Mk e a NHL_5T+5Mk atingem um ganho de massa de cerca de 10%. No caso da cura St a expansão das argamassas não é muito significativa.

A Figura 4.68 apresenta a resistência ao ataque por sulfatos aos 28 dias onde, em cada figura é representada uma mesma composição em cada uma das três condições de cura estudadas. Pela observação das figuras é possível concluir que a cura SP é a que apresenta melhores resultados na maioria das composições, tal como tinha sido constatado na observação visual. A argamassa NHL_5T+10Mk na cura SP perde massa mais rapidamente do que a cura St; no entanto, na conclusão do ensaio acaba por perder menos massa, facto que também foi constatado na realização do ensaio.

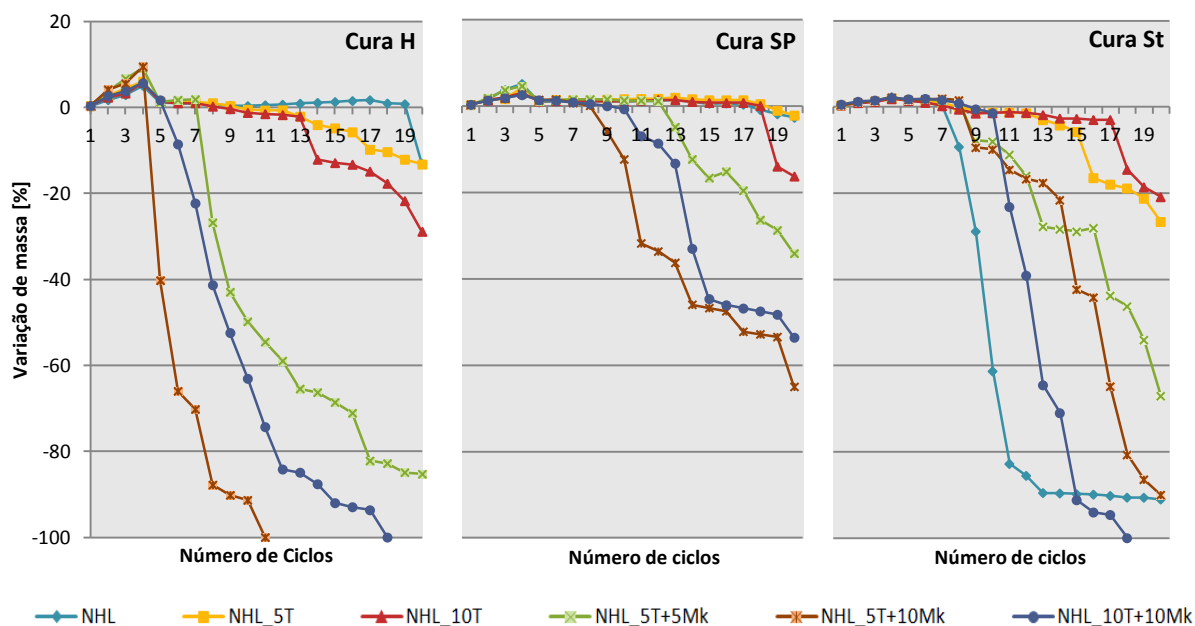


Figura 4.67 – Resistência ao ataque por sulfatos – comparação entre composições aos 28 dias

A cura H nas argamassas com Mk e também na argamassa com 10% de T apresenta o pior comportamento face aos sulfatos por sofrer as maiores variações de massa e mais rapidamente. A argamassa NHL_5T, apesar de sofrer maior expansão quando se trata de uma cura H, sofre maior perda de massa quando sujeita a cura St. Em relação à grande perda de massa sofrida pela argamassa de referência quando sujeita a cura St não foi encontrada qualquer explicação. Infelizmente também não existiam provetes aos 90 dias para comparar o comportamento. No entanto, segundo Grilo (2013), a argamassa de referência sujeita a cura St apresentou, aos 28 dias, pouca variação de massa até ao 15º ciclo, a partir do qual começou a degradar-se até estar completamente degradada no 18º ciclo. Aos 90 dias os provetes na mesma composição e sujeitos à mesma cura não apresentavam variações de massa significativas.

Na Figura 4.69 estão representadas as variações de massa que sofreram os provetes sujeitos ao ensaio de resistência ao ataque por sulfatos aos 90 dias. Neste caso, e em comparação com os resultados obtidos aos 28 dias, é possível concluir facilmente que aos 90 dias as argamassas apresentam um comportamento bastante melhor face ao ataque dos sulfatos. Não se observaram grandes expansões dos provetes e também não são verificadas tantas perdas de massa como no caso dos 28 dias; essas perdas também são mais tardias, ou seja, têm início em ciclos mais avançados. Consideram-se os resultados bastante positivos comparativamente ao que se verificou aos 28 dias.

As argamassas com Mk sujeitas a cura H são as que apresentam aos 90 dias as maiores perdas de massa, em comparação com as restantes condições de cura e com as restantes composições. A NHL_10T+10Mk extingue-se ao ciclo 19; já a NHL_5T+10Mk na conclusão do ensaio ficou resumida a cerca de 15% da sua massa e a NHL_5T+5Mk a cerca de 30% da sua massa. As argamassas com apenas T em substituição de cal sujeitas às curas St e SP, a NHL_5T+5Mk_SP e a NHL_10T+10Mk_SP são as argamassas que apresentam menores variações de massa e, portanto,

melhores resultados. As argamassas da cura SP apresentam em todas as composições menores variações de massa em relação às restantes condições de cura. Até as argamassas com Mk apresentam, comparativamente às argamassas com apenas T sujeitas à cura H, menores perdas de massa.

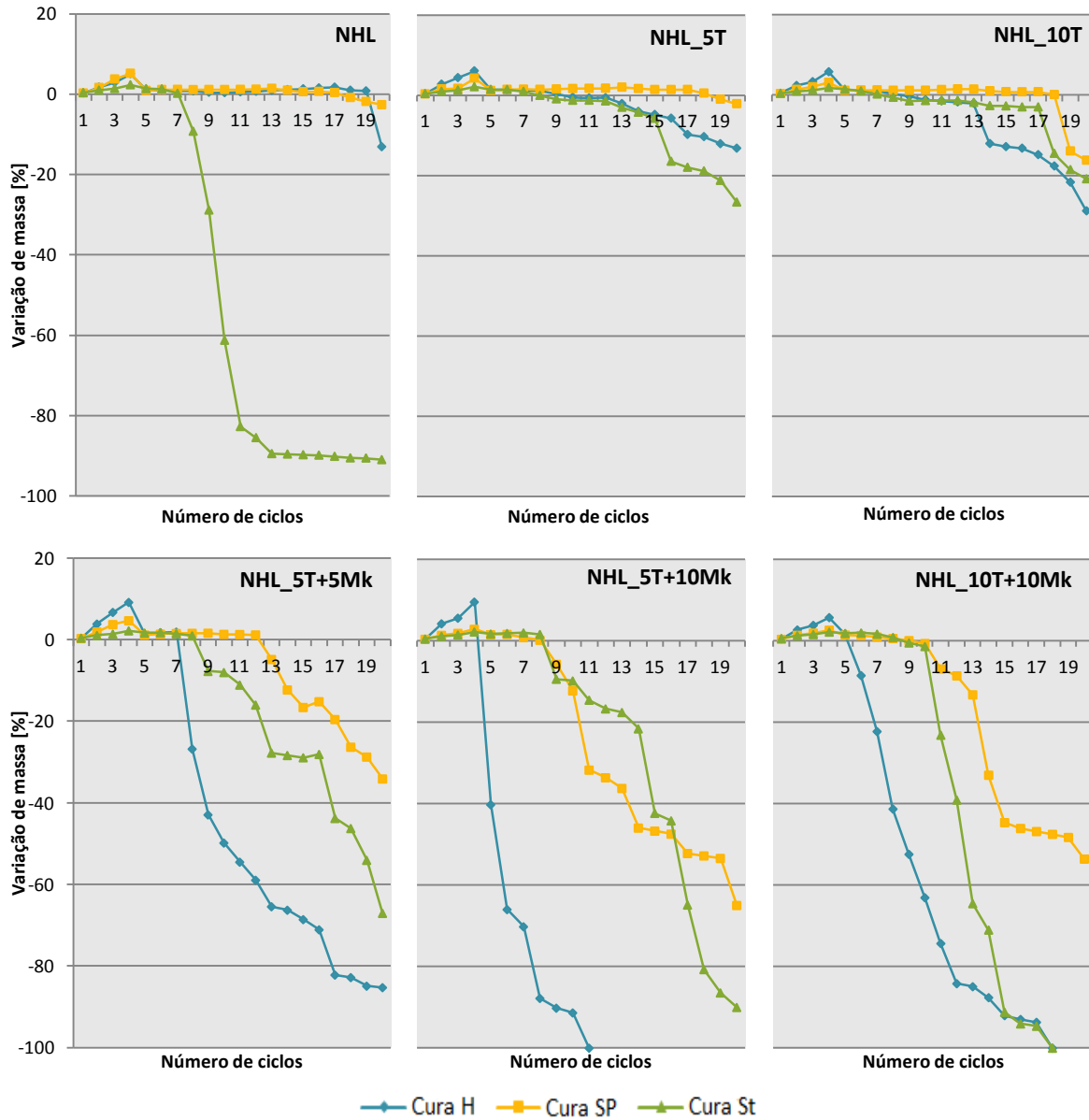


Figura 4.68 – Resistência ao ataque por sulfatos – comparação entre curas aos 28 dias

Na Figura 4.70 estão representadas as variações de massa correspondentes às duas idades em estudo para todas as composições e condições de cura. No caso da NHL_H, no ensaio aos 28 dias verifica-se que durante grande parte do ensaio a massa dos provetes se mantém praticamente constante, ao contrário do que acontece aos 90 dias em que a argamassa começa a perder massa mais cedo; no entanto, no fim do ensaio a totalidade de massa perdida é equivalente nas duas idades. A argamassa NHL_5T foi a única argamassa que apresentou variação de massa superior aos 90

dias, comparativamente ao seu comportamento aos 90 dias. A NHL_10T+10Mk sujeita a cura St apresenta uma diferença muito expressiva entre as perdas de massa verificadas aos 28 dias e aos 90 dias. No caso do ensaio aos 28 dias, a argamassa degrada-se completamente no ciclo 18; no entanto aos 90 dias a argamassa perde apenas 15% da sua massa.

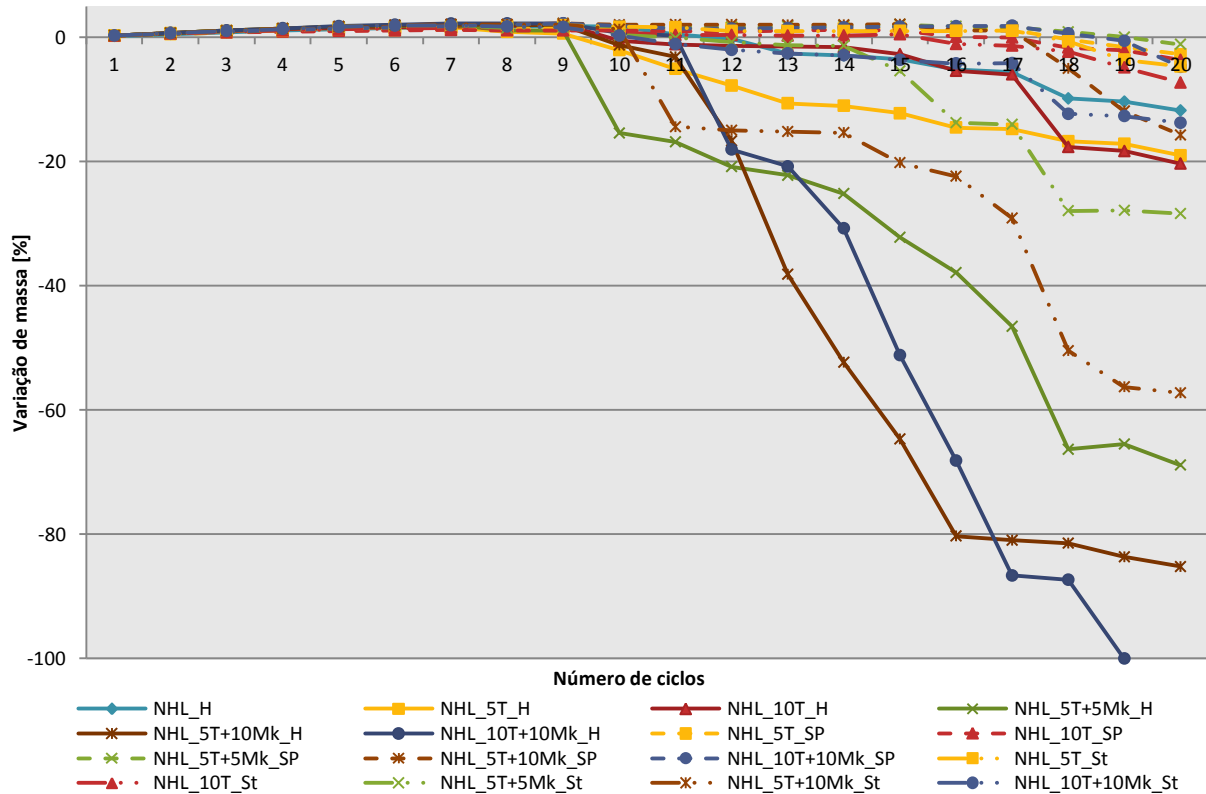


Figura 4.69 – Resistência ao ataque por sulfatos aos 90 dias

As argamassas da cura H apresentam também aos 90 dias grandes perdas de massa; no entanto essas perdas começam mais tardiamente após início do ensaio, em relação aos 28 dias, e as perdas de massa finais são menores. Verifica-se ainda que a NHL_5T+10Mk_H, que apresentava o comportamento mais negativo, degradando-se completamente logo no ciclo 11 aos 28 dias, no caso do ensaio aos 90 dias não chega a degradar-se na totalidade, atingindo uma massa praticamente constante nos últimos ciclos, apesar de muito baixa. As argamassas sujeitas a cura SP, no ensaio aos 90 dias, apresentam ao longo de todo o ensaio um comportamento muito semelhante entre as diversas composições verificando-se muito pouca variação de massa. Apenas se verifica uma maior perda de massa no caso da NHL_5T+10Mk a partir do ciclo 17. Verifica-se ainda que as argamassas com Mk, sujeitas à referida condição de cura, apresentam diferenças significativas em relação aos resultados obtidos aos 28 dias e, com o aumento dos teores de Mk e T, maiores são essas diferenças.

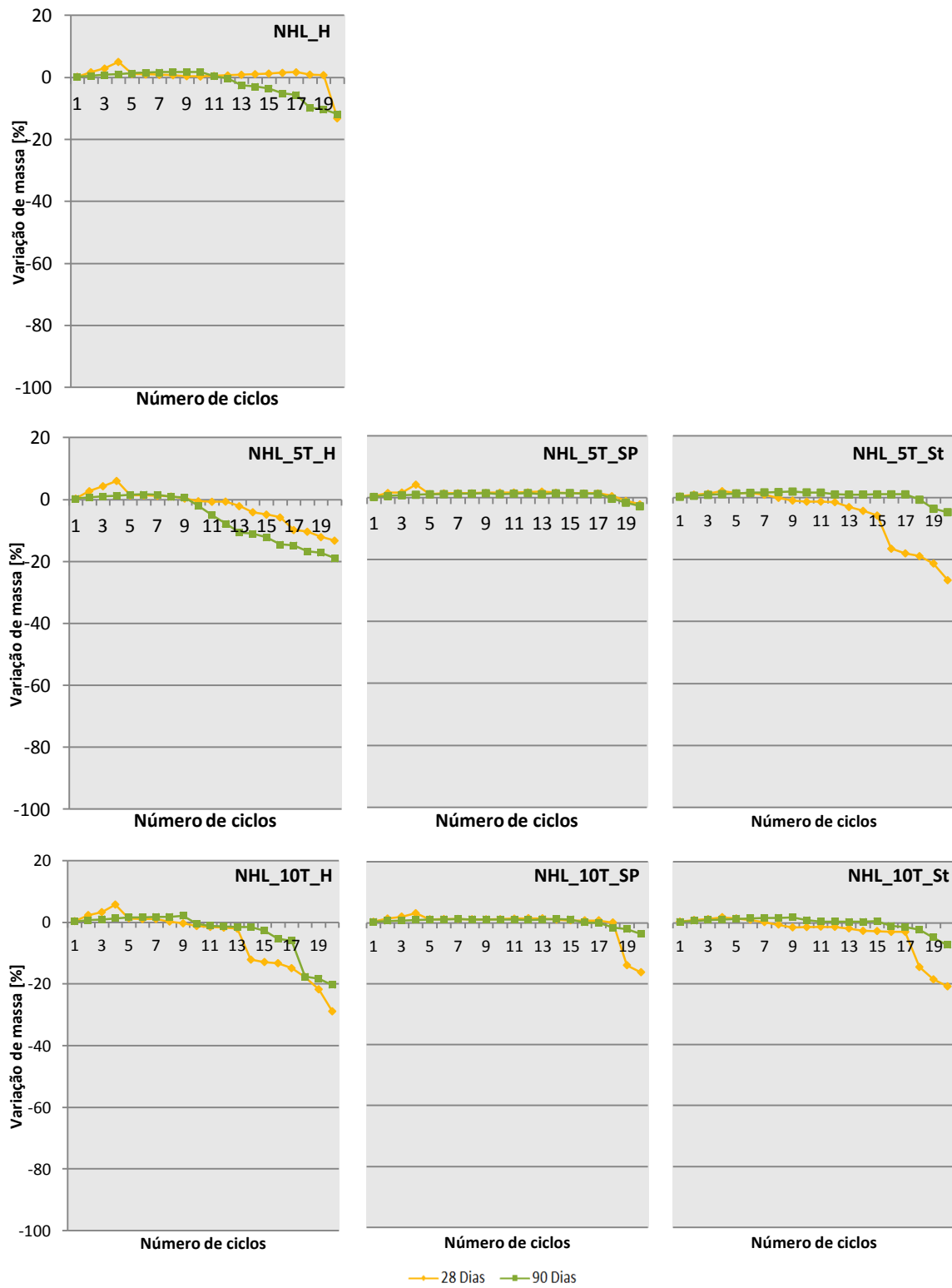


Figura 4.70 – Resistência ao ataque por sulfatos: evolução com a idade (cont.)

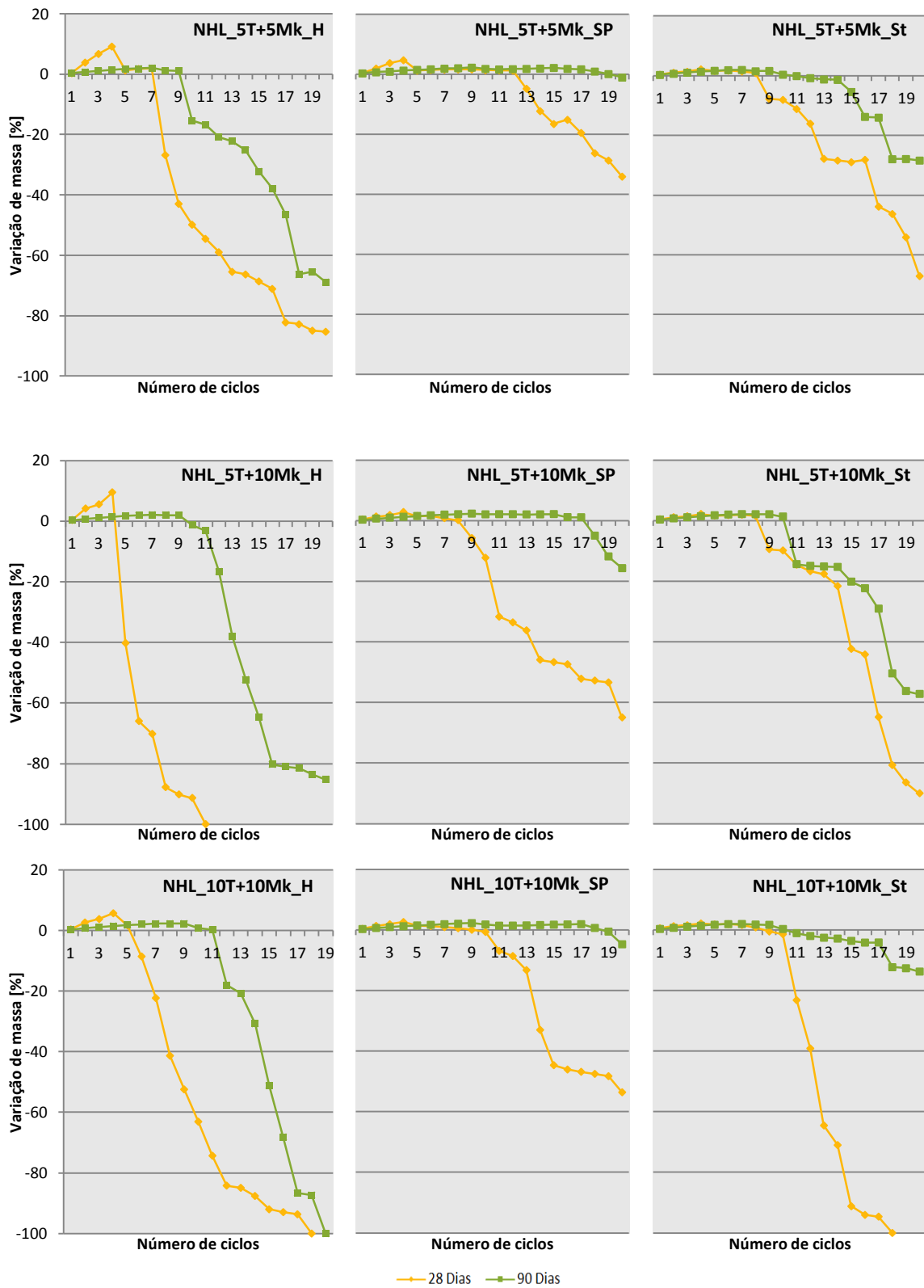


Figura 4.70 – Resistência ao ataque por sulfatos: evolução com a idade

Pelos resultados obtidos, conclui-se que as argamassas com a evolução com a idade tornam-se mais resistentes ao efeito dos sulfatos.

4.4.11. Porosidade aberta

Descrição

A porosidade aberta (Pab) de uma argamassa é a quantificação, por percentagem, do volume de poros abertos ao exterior. A sua análise permite inferir a compactidade da argamassa e pode ser relacionada com parâmetros como a condutibilidade térmica ou as resistências mecânicas.

O ensaio de porosidade aberta foi efetuado pelo método da pesagem hidrostática e com base no preconizado na norma NP EN 1936:2008 [IPQ, 2008], definida para materiais pétreos.

Este foi realizado em pequenas partes íntegras de provetes, separados após as metades de provetes terem sido submetidas ao ensaio de resistência à compressão às idades de 28 dias e 90 dias. Considerou-se que o ensaio de resistência à compressão não influenciou a microporosidade da argamassa.

A porosidade aberta (Pab) permite quantificar a percentagem de poros que são acessíveis ao exterior. Este parâmetro indicia a maior ou menor compactidade da argamassa. Assim, quanto menor o valor de porosidade aberta que a argamassa apresentar, mais compacta esta será.

Procedimento de ensaio

As pequenas partes de cada provete foram colocadas em estufa a $60\pm 5^{\circ}\text{C}$, com cerca de 24h de antecedência ao início do ensaio. Imediatamente antes do início do ensaio limpam-se as superfícies dos provetes, para libertar os grãos soltos, e mediram-se as suas massas secas.

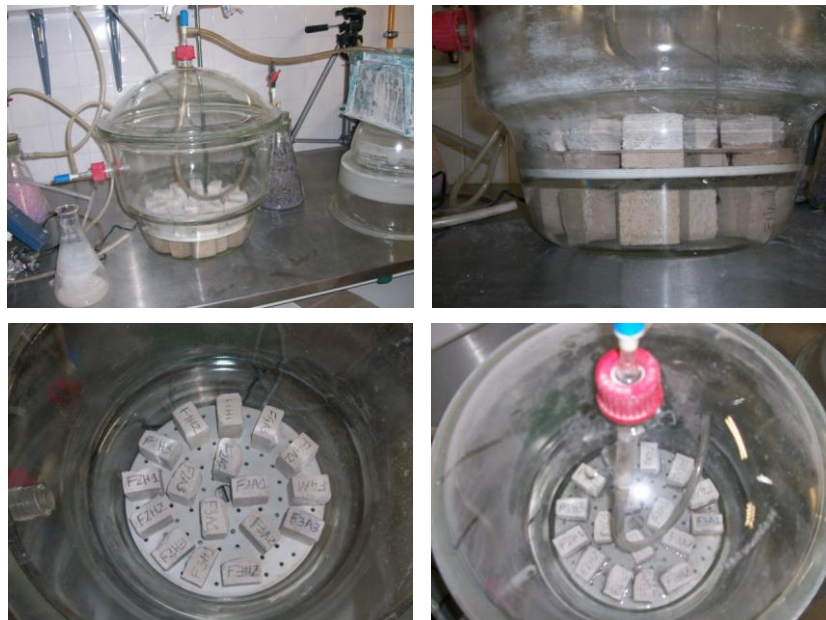


Figura 4.71 – Ensaio de porosidade aberta

Os provetes foram colocados no exsiccador e a bomba de vácuo foi acionada, tendo permanecido durante as primeiras 24h em vácuo. Após 24h de ensaio, inseriu-se água no exsiccador até todos os provetes estarem completamente submersos. A colocação de água foi feita abrindo uma válvula do exsiccador ligado, por intermédio de uma mangueira, a um recipiente com água. A entrada de água deu-se de forma lenta, tendo uma duração superior a 15 minutos. Os provetes permaneceram durante as 24h seguintes submersos e em vácuo. Nas últimas 24h do processo, os provetes foram mantidos submersos mas sujeitos à pressão ambiente do laboratório. Após as referidas 72h de ensaio, os provetes foram retirados do exsiccador e foram feitas duas pesagens, uma hidrostática (provetes colocados num cesto de rede no interior de uma tina de água sob a balança) e outra dos provetes saturados.

Observações

No tratamento dos provetes antes do ensaio, quando se limpavam as superfícies dos provetes, foi possível verificar que os provetes apenas com resíduo cerâmico em substituição da massa de cal são mais frágeis do que os restantes provetes.

Tratamento de resultados

A porosidade aberta é relação entre o volume de poros abertos e o volume aparente do provete. Considerando as massas seca, hidrostática e saturada dos provetes a percentagem de porosidade aberta é calculada através da *Equação 4.3*. Tal como foi referido inúmeras vezes anteriormente, também neste caso foram considerados, para efeitos representativos da argamassa, o valor médio entre as porosidades abertas dos três provetes ensaiados de cada argamassa e condição de cura.

$$P_{ab} = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100$$

Equação 4.12

Em que,

- P_{ab} – Porosidade aberta [%]
- m_s – Massa saturada do provete [g]
- m_h – Massa hidrostática do provete [g]
- m_d – Massa seca do provete [g]

Apresentação e análise de resultados

Os valores de porosidade aberta foram representados num gráfico de barras, permitindo a análise e comparação entre as diversas composições e, dentro de uma mesma composição, o efeito das diversas condições de cura.

Na *Figura 4.72* estão representados graficamente os resultados obtidos no ensaio de porosidade aberta aos 28 dias de idade das argamassas. Verifica-se que não existe uma grande variação entre as diferentes composições de argamassas e as distintas curas. Com efeito, todas apresentam valores na gama dos 22-26%

Pela observação da figura nota-se uma tendência para valores superiores de Pab nas argamassas com Mk, quando sujeitas a curas SP e St, e nas argamassas com apenas T, quando sujeitas a cura H, tendo como base de comparação as restantes composições sujeitas à mesma condição de cura. As argamassas sujeitas a cura St, à exceção das argamassas com apenas T em substituição de cal, apresentam valores de Pab superiores quando comparadas com as restantes condições de cura numa mesma composição. Nessas argamassas com apenas T é a cura H que apresenta maior Pab.

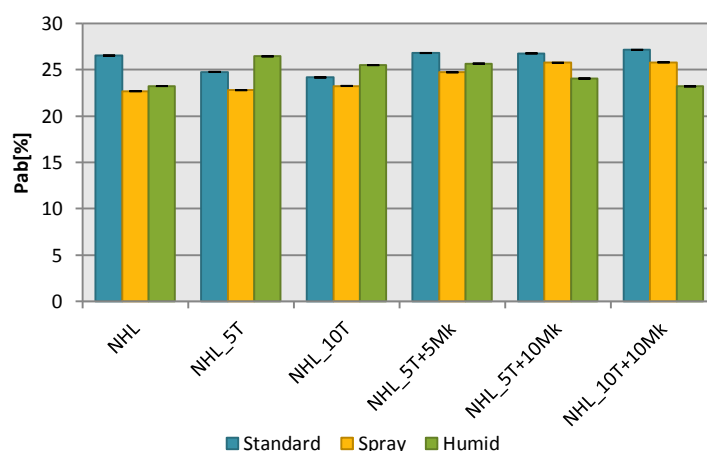


Figura 4.72 – Porosidade aberta aos 28 dias

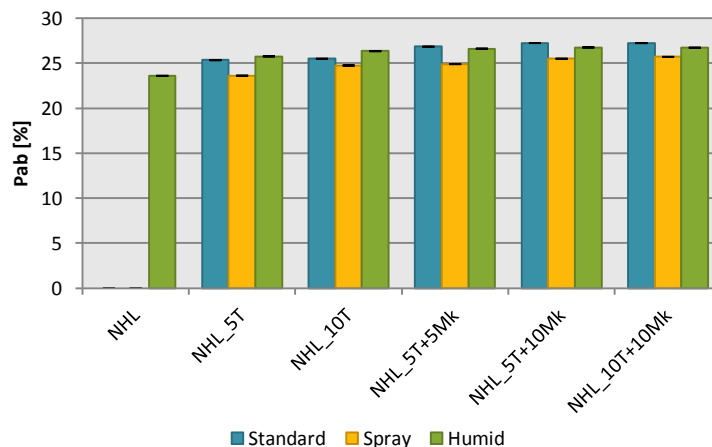


Figura 4.73 – Porosidade aberta aos 90 dias

Em relação à cura H, comparativamente à argamassa de referência, as argamassas com apenas T apresentam valor de Pab superior. Na argamassa com 5% de T é atingido o valor mais alto, mesmo comparativamente às argamassas com Mk; no entanto, Pab diminui com o aumento do teor

de T. Nas argamassas com Mk, Pab também diminui com o aumento dos teores de Mk e T, ou seja, as argamassas têm tendência a ser mais compactas.

No caso da cura SP, a argamassa de referência e a NHL_5T apresentam valores muito semelhantes e inferiores aos das restantes composições. Com o aumento da percentagem de T, Pab aumenta, e com a adoção de Mk e aumento dos teores de Mk e T, Pab aumenta.

Na cura St, a argamassa de referência e as três argamassas com Mk apresentam valores muito próximos. Já nas argamassas com apenas T, Pab é inferior e diminui com o aumento da percentagem de T. Tal não é verificado com o aumento do teor de T na argamassa com Mk, em que há um ligeiro aumento do valor de Pab.

Na *Figura 4.73* estão apresentados os resultados do ensaio de porosidade aberta aos 90 dias das argamassas. Também nesta idade não existe grande variação entre as argamassas e curas, apresentando todas valores de 23-27%. Nesta idade, nas argamassas apenas com T, verifica-se o aumento de Pab com o aumento do teor de T em todas as condições de cura. Na cura H, a argamassa de referência é a que apresenta menor valor de Pab, mesmo comparativamente às outras condições de cura nas restantes composições, à exceção da NHL_5T sujeita a cura SP que apresenta um valor muito semelhante, sendo essas as argamassas que apresentam maior compactidade. As argamassas com Mk, em qualquer uma das condições de cura, apresentam valores muito próximos com o aumento dos teores de T e Mk, tendo como termo de comparação as diferentes composições sujeitas à mesma cura.

Na *Figura 4.74* está representada a evolução com a idade da porosidade aberta. À exceção das argamassas com 10% de Mk sujeitas a cura H, todas as argamassas apresentam valores muito semelhantes com a evolução com a idade. As argamassas com 10% de Mk da referida cura apresentam valores superiores aos 90 dias de idade.

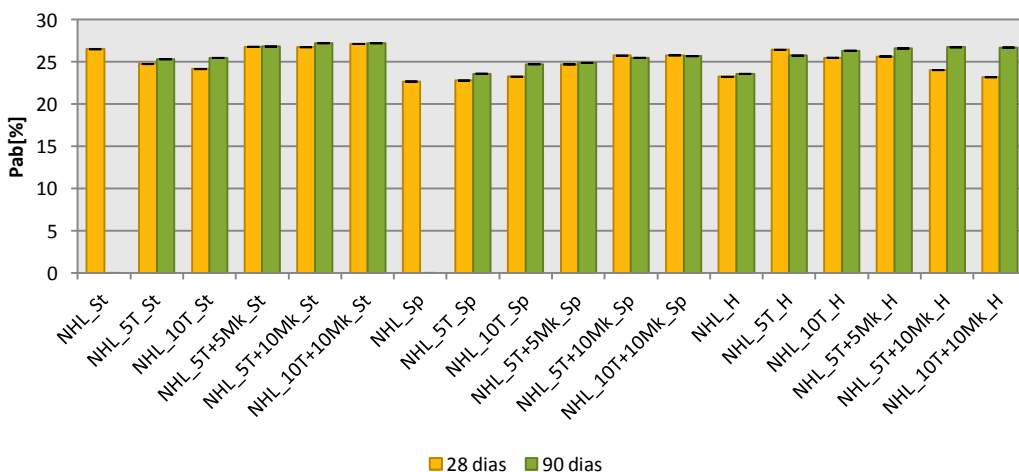


Figura 4.74 – Evolução com a idade da porosidade aberta

4.4.12. Porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP)

Descrição

O ensaio da porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) permite analisar as propriedades microestruturais da argamassa, nomeadamente a sua porosidade aberta, a morfologia dos poros e as gamas de diâmetros dos poros.

O ensaio foi realizado pelo Eng.º Vítor Silva, da FCT-UNL, com recurso a um porosímetro de mercúrio Micromeritics – Autopore IV. Este promove a intrusão de mercúrio nos poros, por um aumento constante da pressão em vácuo, e posterior extrusão (não total) do mercúrio que penetrou nos poros da argamassa devido a uma diminuição da pressão. Com este processo, o software do equipamento traça um gráfico da acumulação da intrusão/extrusão de mercúrio em função da pressão. A sua análise permite conhecer o tipo de poros presentes na argamassa, isto é, a sua morfologia, e quantificar os poros que existem de cada gama de diâmetros.

Foram analisadas amostras provenientes dos provetes prismáticos, após realização do ensaio de resistência à compressão, e das argamassas aplicadas sobre os tijolos cerâmicos. Estas últimas permitem aferir a influência do suporte na porosidade aberta da argamassa, por comparação com os resultados obtidos nos provetes (suporte não poroso).

Procedimento

Foram preparadas pequenas amostras de forma cilíndrica para cada tipo de argamassa/cura. Estas foram posteriormente colocadas em estufa até atingirem massa constante. No início do ensaio, após medida a sua massa, a amostra foi colocada no interior da cápsula do penetrómetro e de seguida medida a massa do conjunto amostra + penetrómetro. O penetrómetro foi inicialmente colocado no módulo de baixa pressão do aparelho, onde ocorreu redução da pressão para 100 μmHg e extração do ar na amostra. O mercúrio foi também introduzido na cápsula no módulo de baixa pressão. A pressão aumenta por patamares até atingir a pressão atmosférica, enquanto o equipamento regista a intrusão de mercúrio nos poros.



Figura 4.75 – Pormenores do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

Após medição da massa do conjunto amostra+penetrômetro+mercúrio, o penetrômetro é inserido no módulo de alta pressão do equipamento e a pressão aumenta por patamares até cerca dos 200MPa. Após esse nível a pressão diminui novamente até à pressão atmosférica. O software regista a intrusão de mercúrio nos poros da argamassa em função do aumento de pressão e a extrusão do mercúrio em função da diminuição de pressão.

Observações

O ensaio não foi realizado às amostras NHL e NHL_10T sujeitas a cura St porque as amostras preparadas destruíram-se, sobretudo a NHL_10T que era muito friável, e não existia mais amostra para as substituir.

Tratamento de resultados

O software do equipamento regista a acumulação da intrusão de mercúrio nos poros em função do incremento de pressão e calcula diretamente alguns parâmetros, como a porosidade e a massa volúmica aparente da argamassa. Com os dados da intrusão incremental de mercúrio, isto é, o volume acumulado de mercúrio nos poros, em função dos diâmetros dos poros, é possível conhecer a distribuição de dimensões dos poros e o volume de poros que existe em cada gama de dimensões.

Apresentação e análise de resultados

Na Figura 4.76 são apresentados os valores de porosidade resultantes de ensaios por dois métodos diferentes, a porosimetria de mercúrio e o método da pesagem hidrostática, descrito em 4.4.11. Como o método da porosimetria de mercúrio é mais rigoroso aceitam-se como mais corretos os valores de porosidade resultantes deste método. No entanto, salienta-se que este foi só aplicado a uma amostra por argamassa/cura/suporte, enquanto o outro foi aplicado a três provetes dos prismas (e não sobre tijolo).

Verifica-se que à exceção da NHL_10T+10Mk sujeita a cura SP, todas as argamassas apresentam porosidade superior no método de porosimetria de mercúrio, sendo a diferença particularmente significativa no caso da NHL_5T após cura húmida. Em relação ao referido método acrescenta-se ainda que os valores de porosidade entre todas as composições/curas são próximos, variando num intervalo de 25-30%, e que as argamassas NHL_5T+5Mk e NHL_5T+10Mk sujeitas a cura H são as que apresentam valores inferiores.

Na Figura 4.77 são apresentados os resultados de porosidade de amostras de argamassa dos revestimentos dos tijolos cerâmicos (que tinham sido sujeitos a cura SP) e dos provetes prismáticos sujeitos a cura SP, avaliados pelo método de porosimetria de mercúrio. Pela análise da figura conclui-se que a porosidade é consistentemente superior nos provetes prismáticos, embora as diferenças não sejam muito significativas. Tal situação parece indicar que a porosidade do suporte de tijolo conduz a uma redução do volume total de poros das argamassas.

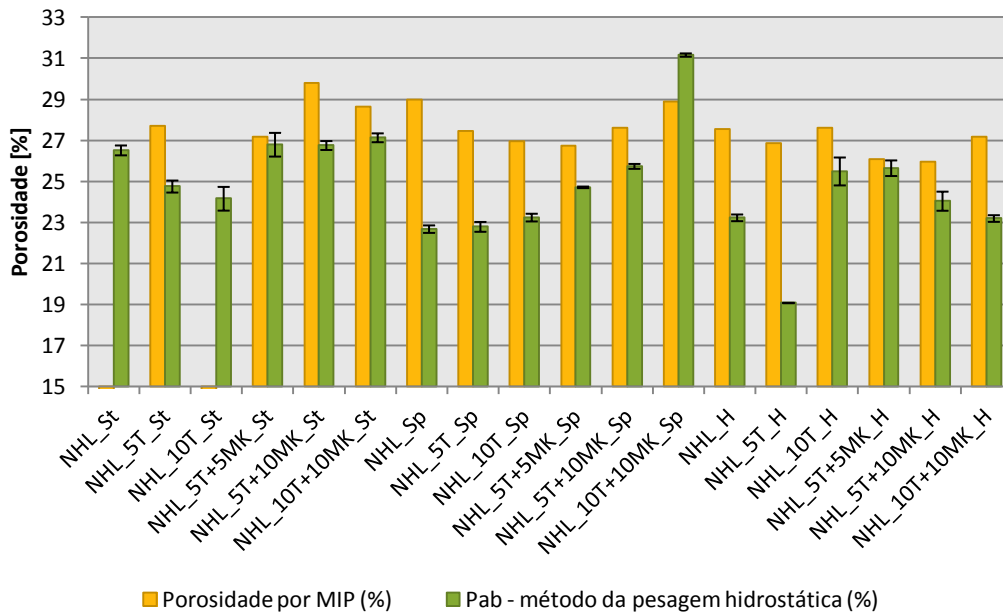


Figura 4.76 – Porosidade das argamassas pelo MIP e pelo método da pesagem hidrostática

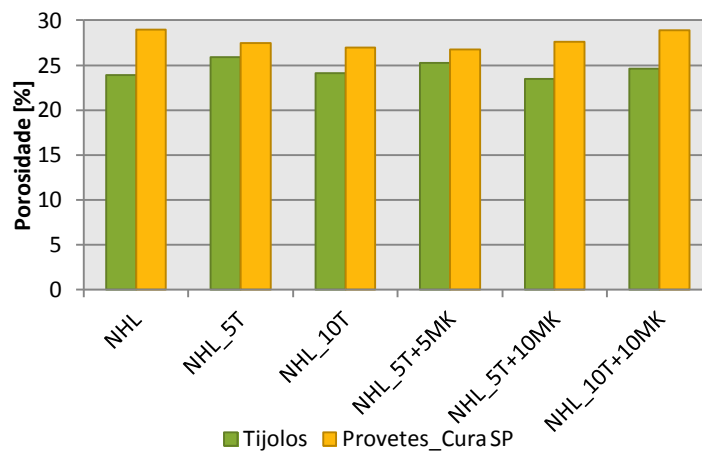


Figura 4.77 – Porosidade por MIP das argamassas nos tijolos e nos provetes sujeitos a cura SP

Na Figura 4.78 estão representadas as distribuições dos diâmetros dos poros das diversas argamassas sujeitas a cura H. É possível verificar que as argamassas com apenas T apresentam maior volume de poros num intervalo de diâmetros entre 0,5 a 1 μm . As argamassas com Mk são as que apresentam poros com menores dimensões, sendo que têm o maior volume de poros num intervalo de diâmetros entre 0,05 a 0,09 μm . A argamassa de referência apresenta poros com maiores dimensões, tendo volumes significativos de poros no intervalo entre 6 a 40 μm .

A Figura 4.79 corresponde à representação das distribuições de diâmetros de poros das argamassas sujeitas a cura St. Esta cura apresenta maiores volumes de poros com maiores dimensões comparativamente às dimensões dos poros das mesmas composições quando sujeitas a cura H. As argamassas com Mk, apesar de terem um volume significativo de poros no intervalo 0,05 a 0,08

µm, sobretudo as com 10% de Mk, apresentam maior volume de poros no intervalo de 0,5 a 0,9 µm. A NHL_5T+5Mk é a que se destaca mais por ter um volume de poros nesse intervalo bastante superior ao das restantes composições. A NHL_5T apresenta maiores volumes de poros nos intervalos 0,5 a 5µm e 5 a 50µm.

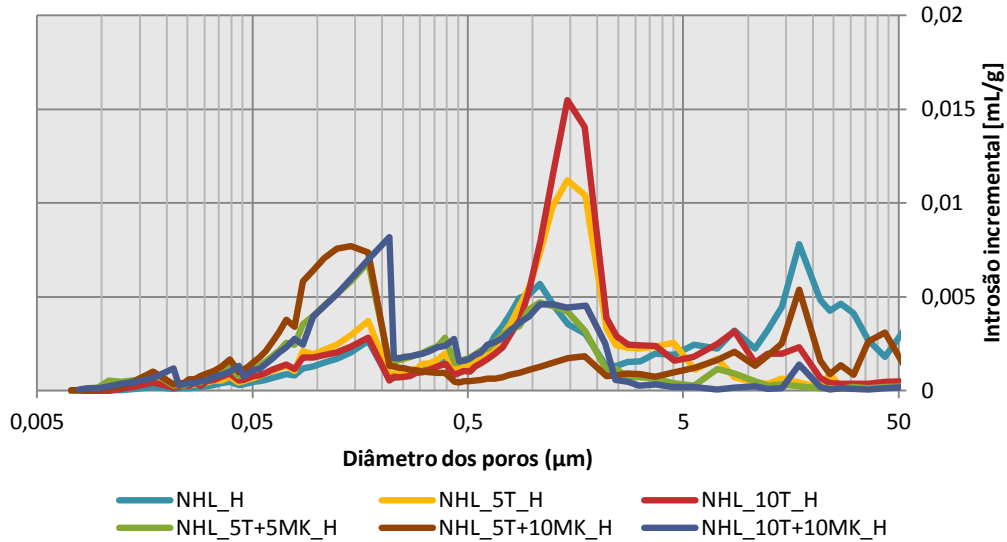


Figura 4.78 – Distribuição do diâmetro de poros das argamassas com cura H

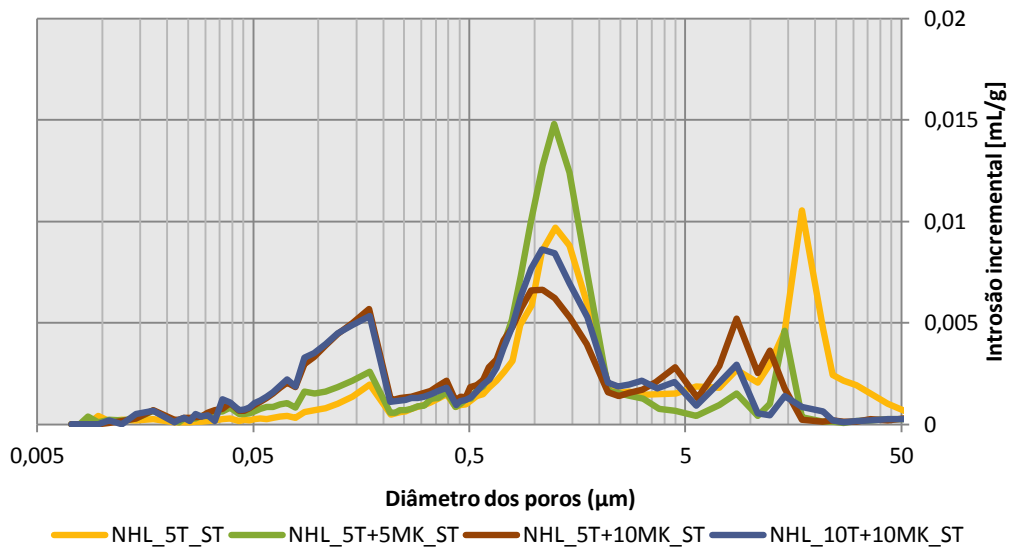


Figura 4.79 – Distribuição do diâmetro de poros das argamassas com cura St

Na Figura 4.80 são apresentadas as distribuições de diâmetros dos poros das argamassas submetidas a cura SP. À semelhança do verificado no caso da cura St, as argamassas com Mk apresentam maior volume de poros na gama entre 0,5 a 0,9 µm. Já as argamassas com apenas resíduo

cerâmico evidenciam maior volume de poros com diâmetros entre 5 a 50 μm . Neste caso, nenhuma das argamassas apresenta volume significativo de poros inferiores a 0,5 μm .

Na *Figura 4.81* estão representadas as distribuições de diâmetros dos poros das argamassas aplicadas como revestimento dos tijolos cerâmicos. Verifica-se claramente que as argamassas com este tipo de aplicação apresentam menor volume de poros com diâmetros entre 0,5 a 50 μm , comparativamente às argamassas sujeitas à mesma cura (SP), mas cujo ensaio foi realizado a uma amostra dos provetes prismáticos. Assim, conclui-se que o suporte influencia bastante a distribuição da dimensão dos poros.

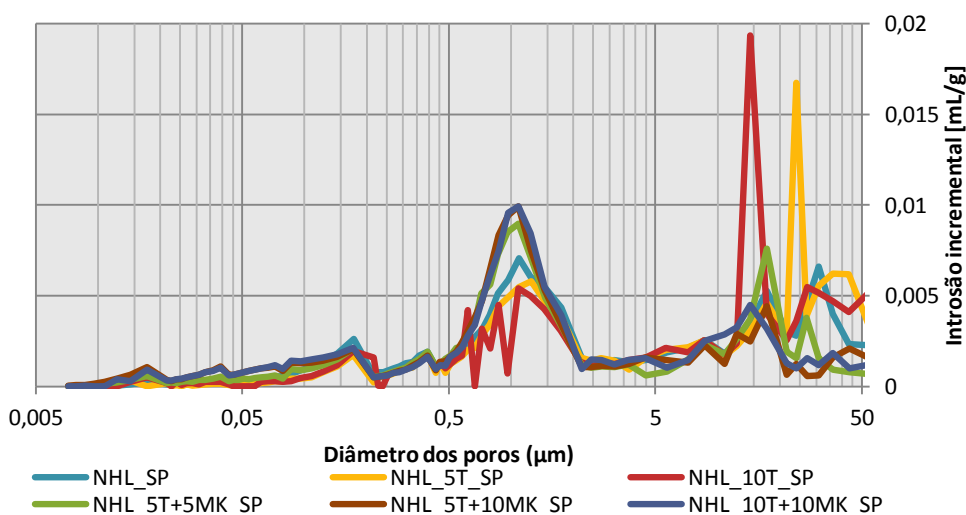


Figura 4.80 – Distribuição do diâmetro de poros das argamassas com cura SP

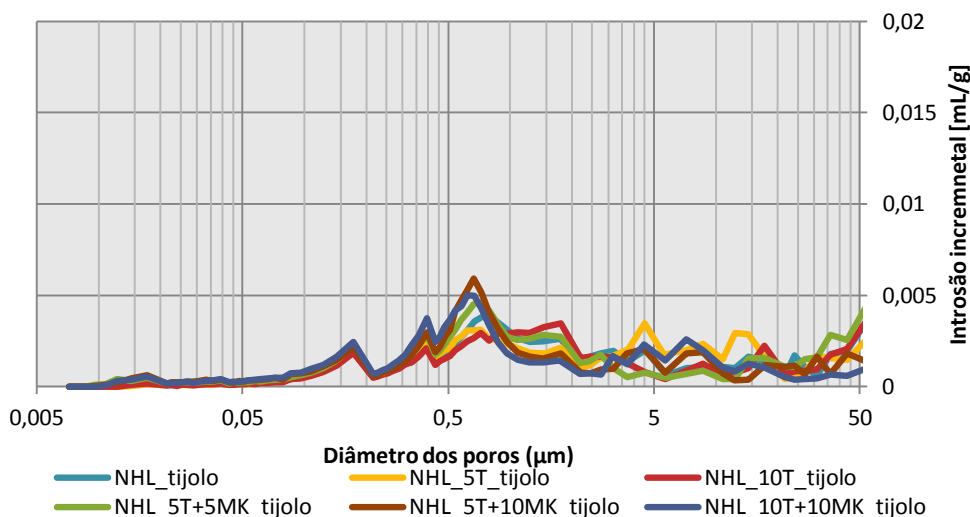


Figura 4.81 – Distribuição do diâmetro de poros das argamassas aplicadas no tijolo cerâmico

Rato (2006) fez referência ao estudo de Fitzner (1994) que apresentou três classificações de poros em função da sua dimensão: De Quervain (1967), DIN 66131 (1973) e Klopfer (1985). Klopfer sugeriu a designação de *microporos* para classificar poros com diâmetro inferior a 0,1 μm ; *poros capi-*

lares para poros com diâmetro no intervalo de 0,1 a 1000 μm ; e *macroporos* para poros com diâmetros superiores a 1000 μm . Segundo essa classificação, mais recente entre as expostas, verifica-se que as argamassas com Mk sujeitas a cura H e St apresentam um volume significativo de microporos. As restantes composições sujeitas a essas condições de cura, todas as sujeitas a cura SP e as do revestimento do tijolo cerâmico apresentam essencialmente poros capilares.

4.4.13. Caracterização química e mineralógica

4.4.13.1 Difração de raios X

Descrição

A técnica da DRX foi descrita no *sub-capítulo 4.2.4.* em relação às análises realizadas aos componentes das argamassas. No presente capítulo são apresentadas as análises referentes às argamassas nas duas idades em estudo e às argamassas após submetidas ao ensaio de resistência ao ataque por sulfatos aos 90 dias de idade dos provetes.

Procedimento

O procedimento de ensaio foi o mesmo já apresentado no sub-capítulo 4.2.4.; no entanto neste ensaio apenas foi utilizada a fração fina da amostra, isto é, a parte enriquecida por ligante. Esta opção visou privilegiar a avaliação da composição mineralógica dos compostos do ligante. Para preparar a fração fina, desagregou-se a argamassa com o auxílio de um martelo de borracha e utilizou-se a porção que passou no peneiro de malha 106 μm . Realizaram-se determinações às diferentes argamassas/curas e ainda a estas mas após contaminação por ensaio de sulfatos.

Apresentação e análise de resultados

Os compostos identificados nas diversas argamassas foram:

- *Portlandite* ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) – mineral que compõe a cal NHL3.5 e que é ainda produzido na reação de hidratação (hidratação da belite), mas que também é consumido na reação de carbonatação e na reação pozolânica;
- *Larnite* (Belite – C_2S) – mineral que compõe a cal NHL3.5 e, quando hidratado, produz silicatos de cálcio hidratados (CSH) no estado amorfo e liberta portlandite;
- *Calcite* (CaCO_3) – mineral que compõe a cal e ainda se forma por carbonatação da portlandite;
- Monocarboaluminato ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{CO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$), hidrocalumite ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e aluminosilicato de cálcio hidratado (CASH – $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) – compostos hidratados que resultam essencialmente da reação pozolânica entre a cal NHL3.5 e pozolanas ricas em alumínio, como o Mk.

- *Etringite* ($Ca_6Al_2(OH)_{12} \cdot (SO_4)_3 \cdot 26H_2O$) – composto formado pela reação entre aluminatos e sulfatos, neste caso pela reação de hidratação do aluminato de cálcio anidro (C_3A) com o hemihidrato. A etringite é um composto que tem designações consoante a sua origem. Assim, a etringite que se forma durante a hidratação dos ligantes hidráulicos é designada por etringite primária e é considerada benéfica porque contribui para o endurecimento nas primeiras horas. Já a etringite que se forma após o endurecimento da argamassa é designada de etringite secundária e tem caráter expansivo, dado o elevado número de moléculas de água que comporta na sua estrutura [SANTOS SILVA, 2009].
- *Monosulfoaluminato* ($Ca_4Al_2(OH)_{12} \cdot SO_4 \cdot 6H_2O$) – composto de hidratação, muito semelhante à etringite, formado também pela reação do hemihidrato com aluminato de cálcio, mas composto por menor número de moléculas de água;
- *Vaterite* ($CaCO_3$) – carbonato de cálcio que é produzido em ciclos de dissolução-cristalização da calcite. Quando exposta a água, a calcite dissolve-se e a sua cristalização ocorre numa estrutura cristalina diferente e que ocupa mais espaço, compactando a estrutura porosa e conferindo mais resistência mecânica à argamassa.
- *Quartzo* (SiO_2) – mineral presente no agregado, na cal NHL3.5, no resíduo cerâmico e no metacaulino;
- *Feldspato potássico* ($KAlSi_3O_8$) – mineral presente no agregado.

Nas Figuras 4.82 e 4.83 são apresentados os difratogramas de todas as composições, quando expostas à cura H até aos 28 dias e aos 90 dias de idade, respetivamente. Nos difratogramas é possível identificar os compostos presentes nas diversas argamassas e comparar as proporções de cada composto entre as composições.

No Quadro 4.8 é apresentada a composição mineralógica identificada nas diversas composições sujeitas a cura H nas duas idades em estudo. As argamassas com Mk sujeitas à cura H, aos 28 dias, apresentam diferenças quando comparadas com as restantes argamassas, que se traduziram no aumento de monocarboaluminato (Mc) e formação de aluminossilicato de cálcio hidratado (CASH) e vaterite (V). A formação de tais compostos foi acompanhada pela diminuição de portlandite e larnite, compostos do ligante (NHL 3.5), associada à diminuição da etringite. Estas diferenças resultam do efeito de diluição do teor de cal e sobretudo pela reação pozolânica com o Mk.

A argamassa de referência mostra com o aumento da idade de cura uma evolução das reações de hidratação e de carbonatação, como seria de esperar, uma vez que diminui o teor de larnite e se verifica o aumento do teor de calcite.

O resíduo cerâmico aparentemente não contribuiu muito para a formação de compostos pozolânicos, uma vez que o aumento do seu teor na argamassa não se traduziu em diferenças significativas ao nível dos compostos mineralógicos formados. Com a evolução da idade, as argamassas

Quadro 4.8 – Compostos identificados nas argamassas sujeitas a cura H nas duas idades

Compostos identificados	NHL		NHL_5T		NHL_10T	
	28d	90d	28d	90d	28d	90d
Calcite (C)	++/+++	+++	++/+++	+++	++/+++	+++
Portlandite (P)	++/+++	++	++/+++	++	++/+++	++
Larnite (L)	+ /++	+	+ /++	+	+ /++	vtg/+
Quartzo (Q)	vtg/+	vtg/+	+	+	+ /++	++
Monocarboaluminato (Mc)	vtg	vtg	vtg	vtg	vtg/+	vtg/+
Hidrocalumite (Hc)	vtg/+	vtg/+	vtg/+	vtg/+	vtg/+	vtg/+
Aluminosilicato de cálcio hidratado (CASH)	-	-	-	-	-	-
Etringite (E)	+	vtg/+	+	vtg/+	+	?
Feldspato potássico (F)	vtg	vtg	-	vtg	vtg	?
Monosulfoaluminato (Ms)	-	-	vtg	-	vtg/?	-
Mulite (Mu)	-	-	vtg	-	vtg	-
Vaterite (V)	-	-	-	-	-	-

Compostos identificados	NHL_5T+5Mk		NHL_5T+10Mk		NHL_10T+10Mk	
	28d	90d	28d	90d	28d	90d
Calcite (C)	++/+++	+++	+++	+++	++	+++
Portlandite (P)	++	+	+	vtg/+	+	vtg/+
Larnite (L)	+	vtg/+	+	vtg/+	+	vtg/+
Quartzo (Q)	+ /++	+	+ /++	+ /++	+ /++	+ /++
Monocarboaluminato (Mc)	+	+	+ /++	+	+ /++	+
Hidrocalumite (Hc)	?	?	?	?	?	?
Aluminosilicato de cálcio hidratado (CASH)	-	-	+	-	+	?
Etringite (E)	+	vtg	vtg	vtg	vtg	?
Feldspato potássico (F)	vtg	?	+	+	+	+ /++
Monosulfoaluminato (Ms)	vtg/+	?	-	-	vtg	?
Mulite (Mu)	-	-	-	-	-	-
Vaterite (V)	-	-	+	+ /++	+	+ /++

Notação: +++ (proporção elevada); ++ (proporção média); + (proporção fraca); vtg (vestígios); - (não detetado); ? (dúvidas na existência)

Nas Figuras 4.84 e 4.85 são apresentados os difratogramas de todas as composições sujeitas a cura St durante 28 dias e 90 dias de idade, respetivamente.

No Quadro 4.9 são apresentados os compostos identificados nas argamassas sujeitas a cura St, nas duas idades de estudo, e as suas respetivas proporções. Nesta cura verifica-se que a argamassa de referência e as argamassas com apenas T têm um comportamento análogo, isto é, não se verificam alterações significativas na composição mineralógica com a introdução de T, nem com o aumento do seu teor, tal como foi verificado na cura H.

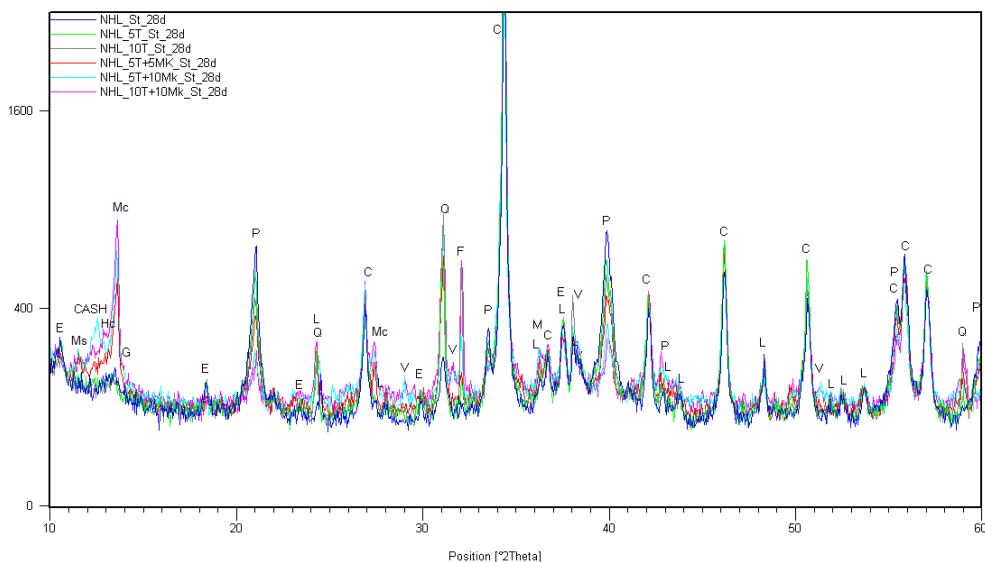


Figura 4.84 – Difratomogramas das composições sujeitas a cura St aos 28 dias

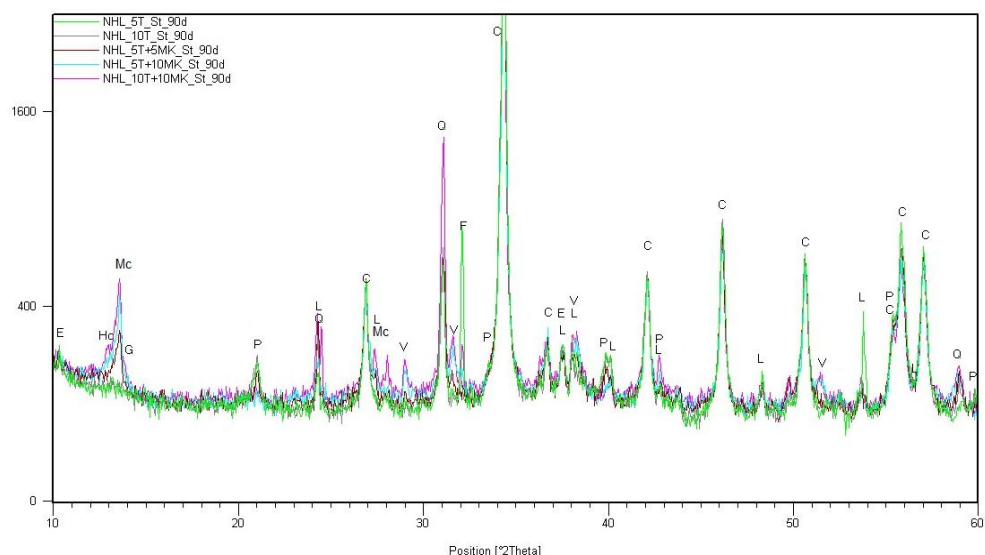


Figura 4.85 – Difratomogramas das composições sujeitas a cura St aos 90 dias

Nas argamassas com Mk, apesar de apresentarem composição análoga para os vários teores de T e Mk, verifica-se que a formação de compostos pozolânicos é menor do que a ocorrida na cura H. Verifica-se igualmente que as argamassas com Mk têm formação de vaterite, e que este composto aumenta com a idade.

Também com a evolução com a idade verifica-se que a reação de carbonatação evolui e que é acompanhada pela de hidratação (aumento da calcite e diminuição da larnite dos 28 para os 90 dias de idade).

Quadro 4.9 – Compostos identificados nas argamassas sujeitas a cura *St* nas duas idades

Compostos identificados	NHL		NHL_5T		NHL_10T	
	28d	90d	28d	90d	28d	90d
Calcite (C)	++/+++	NA	++/+++	+++	++/+++	+++
Portlandite (P)	++	NA	++	vtg/+	+ /+++	vtg/+
Larnite (L)	+ /++	NA	+ /++	+	+ /++	vtg/+
Quartzo (Q)	vtg/+	NA	+	+	+ /+++	+
Monocarboaluminato (Mc)	vtg	NA	vtg	?	vtg	?
Hidrocalumite (Hc)	vtg	NA	vtg	?	vtg	?
Aluminosilicato de cálcio hidratado (CASH)	-	NA	-	-	-	-
Etringite (E)	vtg	NA	vtg	vtg/?	vtg	-
Feldspato potássico (F)	-	NA	vtg	+	+	vtg
Monosulfoaluminato (Ms)	-	NA	-	-	-	-
Vaterite (V)	-	NA	-	-	-	-

Compostos identificados	NHL_5T+5Mk		NHL_5T+10Mk		NHL_10T+10Mk	
	28d	90d	28d	90d	28d	90d
Calcite (C)	++/+++	+++	++/+++	+++	++/+++	+++
Portlandite (P)	+	vtg/+	vtg/+	-	vtg/+	-
Larnite (L)	+ /++	+	+ /++	+	+ /++	+
Quartzo (Q)	+ /++	+ /++	+ /++	+ /++	+ /++	+ /++
Monocarboaluminato (Mc)	+	vtg/+	+ /++	vtg/+	+ /++	vtg/+
Hidrocalumite (Hc)	vtg	?	?	?	vtg	vtg
Aluminosilicato de cálcio hidratado (CASH)	-	-	vtg/+	-	vtg	?
Etringite (E)	vtg	-	vtg	-	vtg	vtg
Feldspato potássico (F)	vtg/+	-	vtg/+	-	+	vtg/+
Monosulfoaluminato (Ms)	vtg	-	vtg	-	?	-
Vaterite (V)	-	vtg	vtg	+	vtg	+

Notação: +++ (proporção elevada); ++ (proporção média); + (proporção fraca); vtg (vestígios); - (não detetado); ? (dúvidas na existência); NA (não analisado)

Nas Figuras 4.86 e 4.87 são apresentados os difratogramas das argamassas expostas a cura SP durante 28 e 90 dias de idade, respetivamente.

No Quadro 4.10 estão identificados os compostos mineralógicos presentes nas argamassas sujeitas à cura SP nas duas idades estudadas. Nesta cura, e comparativamente à cura H, há uma menor formação de compostos hidratados, situação análoga à verificada nas argamassas da cura St.

Os compostos hidráulicos têm carácter instável e é notório que, com a introdução de Mk, há diminuição do teor de portlandite livre nas argamassas, composto esse que já não é detetado aos 90 dias.

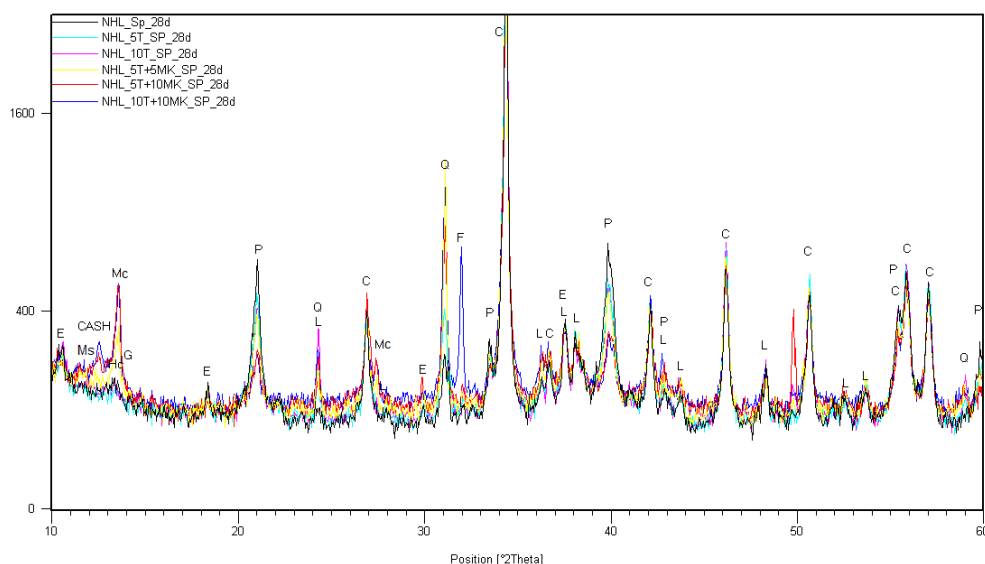


Figura 4.86 – Difractogramas das composições sujeitas a cura SP aos 28 dias

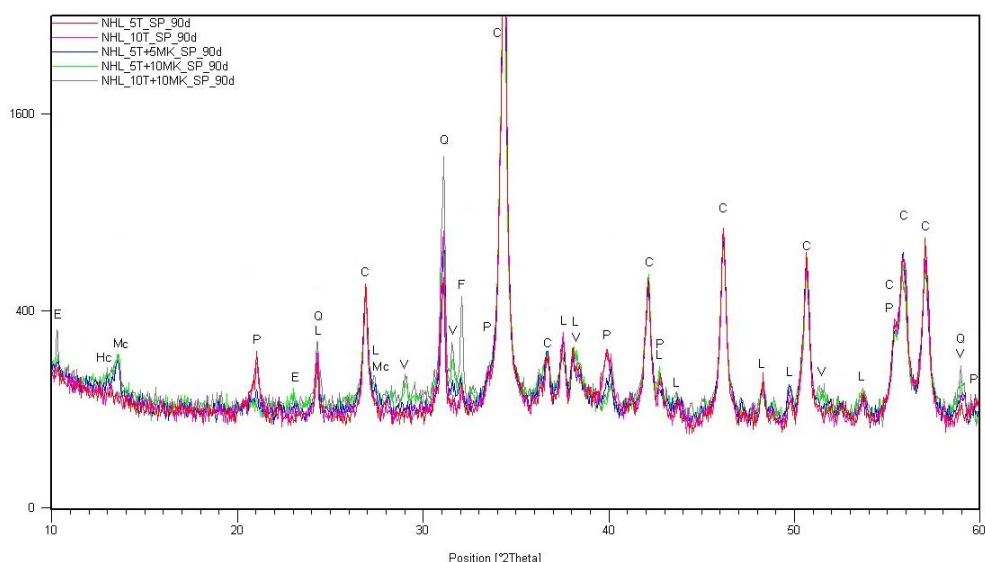


Figura 4.87 – Difractogramas das composições sujeitas a cura SP aos 90 dias

Pela análise dos compostos formados nas diversas argamassas sujeitas às diversas curas estudadas conclui-se que a condição de cura não influencia o tipo de compostos formados, mas influencia as suas proporções, em particular a cura H que foi das três curas a que promoveu a maior formação de compostos hidratados.

Em termos do efeito da cura há a salientar a maior formação de etringite nas argamassas sujeitas a cura H, facto que indicia uma maior reação de hidratação nessa condição. A formação de vaterite também é beneficiada numa cura H, verificando-se que nesta cura existe maior teor desse composto.

Quadro 4.10 – Compostos identificados nas argamassas sujeitas a *cura SP* nas duas idades

Compostos identificados	NHL		NHL_5T		NHL_10T	
	28d	90d	28d	90d	28d	90d
Calcite (C)	++/+++	NA	+++	+++	+++	+++
Portlandite (P)	++	NA	+/>+++	+	+/>+++	+
Larnite (L)	+/>+++	NA	+/>+++	+	+/>+++	+/>+++
Quartzo (Q)	vtg/+	NA	+	+/>+++	+/>+++	+/>+++
Monocarboaluminato (Mc)	vtg	NA	?	-	?	-
Hidrocalumite (Hc)	vtg	NA	vtg	-	?	-
Aluminosilicato de cálcio hidratado (CASH)	-	NA	-	-	-	-
Etringite (E)	vtg/+	NA	vtg/+	-	+	-
Feldspato potássico (F)	-	NA	-	vtg	vtg	vtg
Monosulfoaluminato (Ms)	-	NA	-	-	?	-
Vaterite (V)	-	NA	-	-	-	-

Compostos identificados	NHL_5T+5Mk		NHL_5T+10Mk		NHL_10T+10Mk	
	28d	90d	28d	90d	28d	90d
Calcite (C)	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Portlandite (P)	+/>+++	vtg	+	-	+	-
Larnite (L)	+/>+++	+	+/>+++	+	+/>+++	+
Quartzo (Q)	+/>+++	+/>+++	+/>+++	+/>+++	+/>+++	+/>+++
Monocarboaluminato (Mc)	vtg/+	vtg	+	vtg	+	vtg
Hidrocalumite (Hc)	?	-	?	-	?	-
Aluminosilicato de cálcio hidratado (CASH)	?	-	vtg	-	vtg/+	?
Etringite (E)	vtg/+	-	vtg/+	?	vtg/+	?
Feldspato potássico (F)	vtg	vtg	vtg	vtg	+	+
Monosulfoaluminato (Ms)	vtg	-	?	-	?	-
Vaterite (V)	-	-	-	vtg	-	vtg

Notação: +++ (proporção elevada); ++ (proporção média); + (proporção fraca); vtg (vestígios); - (não detetado); ? (dúvidas na existência); NA (não analisado)

Por comparação das mesmas composições mas sujeitas a condições de cura diferentes, verifica-se entre as argamassas de referência (*Figura 4.88*) que os compostos formados são os mesmos e as suas proporções semelhantes; no entanto, apesar das diferenças serem ligeiras, a argamassa de referência sujeita a cura húmida apresenta uma proporção de portlandite superior e de larnite inferior, resultado das reações de hidratação. A proporção de etringite também é superior na argamassa da cura H, pelos motivos já referidos.

Nas argamassas com material cerâmico e sem Mk, NHL_5T (*Figura 4.89*) e NHL_10T, à semelhança do verificado para as argamassas de referência, também na cura H se constatou maior proporção de portlandite e menor de calcite. Na mesma cura ainda se verifica uma aparente formação

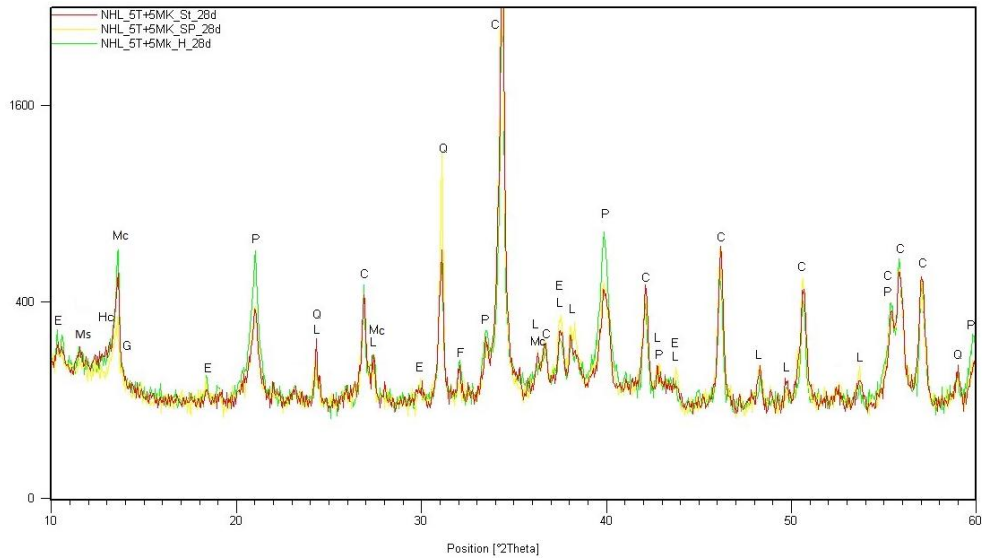


Figura 4.90 – Difratomogramas das argamassas NHL_5T+5Mk nas curas H, St e SP

Nas composições com 10% de Mk, NHL_5T+10Mk e NHL_10T+10Mk (Figura 4.91), as diferenças entre os difratogramas das três condições de cura são mínimas; no entanto existem alguns compostos hidratados em maior proporção nas curas H e St, nomeadamente aluminossilicato de cálcio hidratado, monocarboaluminato e vaterite. No caso da cura NHL_10T+10Mk, a hidrocalumite destaca-se na cura St. As tendências aos 90 dias mantêm-se; no entanto verifica-se a formação de vaterite nas três condições de cura, mas em maior proporção na cura H.

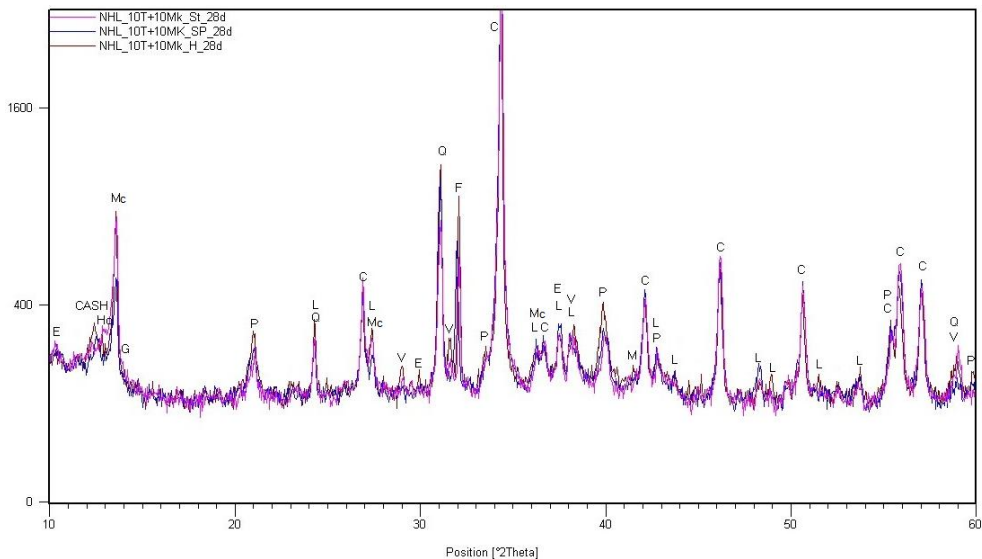


Figura 4.91 – Difratomogramas das argamassas NHL_10T+10Mk nas curas H, St e SP

As argamassas com 10% de Mk nas curas St e SP, e ainda a NHL_5T+5Mk sujeita a cura SP, aos 90 dias de idade não apresentam portlandite na sua composição, o que significa que foi con-

Quadro 4.11 – Compostos identificados nas argamassas da cura H após contaminação por sulfatos

Compostos identificados	NHL	NHL_5T	NHL_10T	NHL_5T+5Mk	NHL_5T+10Mk	NHL_10T+10Mk
Thenardite (Th)	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Cesanite (Ce)	+	+	++	+	-	-
Calcite (C)	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Portlandite (P)	-	-	-	-	-	-
Larnite (L)	-	-	-	-	-	-
Monocarboaluminato (Mc)	+	+	++	++	+	++

Quadro 4.12 – Compostos identificados nas argamassas da cura St após contaminação por sulfatos

Compostos identificados	NHL	NHL_5T	NHL_10T	NHL_5T+5Mk	NHL_5T+10Mk	NHL_10T+10Mk
Thenardite (Th)	NA	+++	+++	+++	+++	+++
Cesanite (Ce)	NA	-	vgt	-	-	-
Calcite (C)	NA	+++	+++	+++	+++	+++
Portlandite (P)	NA	-	-	-	-	-
Larnite (L)	NA	-	-	-	-	-
Monocarboaluminato (Mc)	NA	+	+	+	++	++

Quadro 4.13 – Compostos identificados nas argamassas da cura SP após contaminação por sulfatos

Compostos identificados	NHL	NHL_5T	NHL_10T	NHL_5T+5Mk	NHL_5T+10Mk	NHL_10T+10Mk
Thenardite (Th)	NA	+++	+++	+++	+++	+++
Cesanite (Ce)	NA	+	+	-	-	vgt
Calcite (C)	NA	+++	+++	+++	+++	+++
Portlandite (P)	NA	-	-	-	-	-
Larnite (L)	NA	-	-	-	-	-
Monocarboaluminato (Mc)	NA	+	+	+	+++	+++

4.4.13.2 Análise Termogravimétrica

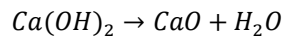
Descrição

A análise termogravimétrica (ATG) foi descrita no subcapítulo 4.2.5. quando apresentados os resultados referentes às análises aos constituintes. No presente capítulo são apresentados os resultados das análises feitas às argamassas nas duas idades em estudo.

Numa argamassa de cal com propriedades hidráulicas podem ocorrer variações de massa em determinadas gamas de temperatura, que são características de decomposições térmicas de compostos hidratados e/ou carbonatados presentes na argamassa. Assim, tendo em consideração a composição mineralógica obtida, atribuíram-se às seguintes reações as variações de massa ocorridas:

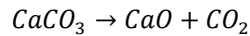
- Temperatura ambiente e cerca dos 200°C: perdas de água de humidade e de compostos hidratados, tais como silicatos, aluminatos e sulfoaluminatos de cálcio hidratados.

- 400°C e cerca dos 500°C: essencialmente perda de água da desidratação da portlandite.



Equação 4.13

- 500°C e cerca dos 850°C: perda de dióxido de carbono por descarbonatação dos carbonatos (essencialmente calcite).



Equação 4.14

Nas argamassas de referência, a belite (Iarnite – C₂S), no estado cristalino, quando hidratada, forma silicato de cálcio hidratado (CSH), gel amorfo, e hidróxido de cálcio (portlandite). Assim, uma parte da portlandite presente na argamassa provem da cal e outra parte forma-se na reação de hidratação. A portlandite é posteriormente consumida na reação de carbonatação, reação na qual se dá a formação de calcite, e a que não carbonata é designada de portlandite livre. Nas argamassas com pozolanas, a reação pozolânica também consome portlandite.

Com o conhecimento das perdas de massa da desidratação da portlandite e da descarbonatação da calcite é possível calcular os teores de portlandite livre, consumida nas reações de carbonatação e pozolânica, e por exclusão de partes a produzida na hidratação da argamassa.

Procedimento

Antes do início das análises, foi necessário preparar as amostras. Para tal, esmagou-se uma pequena porção de cada argamassa até todo o conteúdo passar num peneiro de malha de 106µm. Após secagem a 40° C, pesou-se uma pequena quantidade da amostra moída num porta-amostras de platina-ródio, que foi previamente tarado, e que foi de seguida introduzido no equipamento ATG, e o ensaio foi iniciado.



Figura 4.95 – Preparação da amostra global das argamassas

Tratamento de resultados

Os valores das variações de massa, obtidos através da análise das curvas TG, foram utilizados para o cálculo dos teores de portlandite livre (Ca(OH)₂) e de calcite (CaCO₃) por aplicação das equações 4.15 e 4.16, respetivamente.

$$\text{Teor } [Ca(OH)_2] \text{ livre}(\%) = v. m._{400-500^\circ c} \times \frac{M_{Ca(OH)_2}}{M_{H_2O}}$$

Equação 4.15

Em que,

- $v. m._{400-500^\circ c}$ – Variação de massa na gama de temperaturas entre 400 e 500°C
- $M_{Ca(OH)_2}$ – Massa molar do $Ca(OH)_2$ ($M_{Ca(OH)_2} = 74g/mol$)
- M_{H_2O} – Massa molar do H_2O ($M_{H_2O} = 18g/mol$)

$$\text{Teor } [CaCO_3](\%) = v. m._{500-850^\circ c} \times \frac{M_{CaCO_3}}{M_{CO_2}}$$

Equação 4.16

Em que,

- $v. m._{500-850^\circ c}$ – Variação de massa na gama de temperaturas entre 500 e 850°C
- M_{CaCO_3} – Massa molar do $CaCO_3$ ($M_{CaCO_3} = 100g/mol$)
- M_{CO_2} – Massa molar do CO_2 ($M_{CO_2} = 44g/mol$)

O teor total de calcite da argamassa seria resultante da carbonatação da argamassa se a cal não estivesse já à partida parcialmente carbonatada. Assim o teor de carbonatos de qualquer argamassa teve de ser corrigido para ter em conta o valor de calcite na matéria-prima.

Os teores de portlandite e calcite presentes na cal NHL 3.5, e obtidos na análise ATG, foram convertidos para proporção de cal utilizada na argamassa de referência (correspondente a 16,8% da massa total de constituintes secos) os quais se apresentam no *Quadro 4.14*. Foram ainda calculados os teores de calcite presentes no resíduo cerâmico, que foram também contabilizados no teor total de calcite da argamassa (relativamente à proporção de resíduo, 5% ou 10%, utilizado na argamassa). Constatou-se que esses teores são muito baixos (0,01% e 0,02%) e sem grande influência nos resultados dos cálculos.

Quadro 4.14 – Teores de portlandite e calcite na cal e na argamassa de referência

	Teor na NHL3.5 (%)	Teor na argamassa (%)
Portlandite	29,6	4,97
Calcite	24,3	4,08

Conforme já referido, nas argamassas com pozolanas ocorrem três reações: a reação de hidratação, a de carbonatação e a pozolânica. Após cálculo dos teores de portlandite carbonatada e de portlandite livre, restam desconhecidos os valores de portlandite formada na hidratação e a consumida na reação pozolânica. Como nas argamassas de referência não ocorre reação pozolânica, é possível determinar a quantidade total de portlandite na argamassa pela soma dos teores de portlandite livre com os de portlandite carbonatada, e desta forma determinar assim a saber o teor de por-

landite formada por hidratação. Assumiu-se assim que a reação de hidratação ocorre da mesma forma que nas argamassas de referência, apenas corrigindo o teor efetivo de cal.

A título de exemplo dos cálculos efetuados tem-se a argamassa de referência da cura húmida aos 28 dias (NHL_H):

Para calcular o teor de portlandite livre na argamassa:

- v.m._{400-500°C} = 0,61%

$$T_{[Ca(OH)_2]} \text{ livre}(\%) = 0,61 \times \frac{74}{18} = 2,51\% \text{ de } Ca(OH)_2$$

Equação 4.17

Para calcular o teor de calcite total na argamassa:

- v.m._{500-850°C} = 4,18%

$$T_{[CaCO_3]} = 4,18 \times \frac{100}{44} = 9,5\% \text{ de } CaCO_3$$

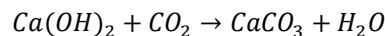
Equação 4.18

O teor total de calcite na NHL_H foi corrigido para ter em conta o teor de calcite inicial na cal (4,08%), pelo que o teor de calcite produzida por carbonatação é de:

$$T_{CaCO_3} \text{ produzida por carbonatação} = 9,50 - 4,08 = 5,42\%$$

Equação 4.19

O teor de carbonatos produzidos na reação de carbonatação pode ser expresso em teor de portlandite consumida, de acordo com a reação apresentada na *Equação 4.20*. O teor de portlandite carbonatada foi calculado através da *Equação 4.21*.



Equação 4.20

$$T_{Ca(OH)_2} \text{ carbonatada} (\%) = \text{Teor } [CaCO_3] \times \frac{M_{Ca(OH)_2}}{M_{CaCO_3}} = 5,42 \times \frac{74}{100} = 4,01\%$$

Equação 4.21

Em que,

- $T_{[CaCO_3]}$ – Teor de calcite formada por carbonatação (%)
- $M_{Ca(OH)_2}$ – Massa molar do $Ca(OH)_2$ ($M_{Ca(OH)_2} = 74g/moll$)
- M_{CaCO_3} – Massa molar do $CaCO_3$ ($M_{CaCO_3} = 100g/moll$)

O teor total de portlandite na argamassa de referência é calculado através da *Equação 4.22*.

$$T_{Ca(OH)_2} \text{ total} (\%) = T_{Ca(OH)_2} \text{ livre} + T_{Ca(OH)_2} \text{ carbonatado} = 2,51 + 4,01 = 6,52\%$$

Equação 4.22

O teor de portlandite produzido por hidratação resulta da diferença entre o teor total e o teor de portlandite da cal (4,97%).

$$T_{Ca(OH)_2} \text{ produzido (\%)} = T_{Ca(OH)_2} \text{ total} - T_{Ca(OH)_2} \text{ NHL3.5} = 6,52 - 4,97 = 1,55\%$$

Equação 4.23

Com estes resultados é possível calcular as taxas de carbonatação e de hidratação, por aplicação das *Equações 4.24 e 4.25*, respetivamente.

$$\text{Taxa}_{\text{carbonatação}} (\%) = \frac{T_{Ca(OH)_2} \text{ carbonatado}}{T_{Ca(OH)_2} \text{ total}} \times 100 = \frac{4,01}{6,52} \times 100 = 61,52\%$$

Equação 4.24

$$\text{Taxa}_{\text{hidratação}} (\%) = \frac{T_{Ca(OH)_2} \text{ produzido}}{T_{Ca(OH)_2} \text{ total}} \times 100 = \frac{1,55}{6,52} \times 100 = 23,69\%$$

Equação 4.25

Nas argamassas com pozolanas, é ainda necessário calcular o teor de portlandite consumida na reação pozolânica. Esse teor resulta da diferença entre o teor total de portlandite e a soma os teores de portlandite livre com a consumida na reação de carbonatação. Considerou-se para esse cálculo que a quantidade de portlandite total na argamassa com pozolanas é igual da argamassa de referência, devidamente corrigida pelo teor efetivo de cal na argamassa.

Considerando como exemplo a argamassa NHL_10T+10Mk_H aos 28 dias, o teor efetivo de cal na argamassa é de 80%. Os cálculos iniciais dos teores de portlandite livre e de calcite são efetuados da mesma forma que para as argamassas de referência (*Equações 4.17 e 4.18*). A correção do teor calcite formada por carbonatação entra, neste caso, não só em conta com o teor de calcite presente em 80% de cal da argamassa mas também com o teor de calcite presente nos 10% de T (*Equação 4.28*).

- v.m._{400-500°C} = 0,21%

$$T_{[Ca(OH)_2]} \text{ livre (\%)} = 0,21 \times \frac{74}{18} = 0,86\% \text{ de } Ca(OH)_2$$

Equação 4.26

- v.m._{500-850°C} = 3,2%

$$T_{[CaCO_3]} = 3,2 \times \frac{100}{44} = 7,27\% \text{ de } CaCO_3$$

Equação 4.27

$$T_{CaCO_3} \text{ produzida por carbonatação} = 7,27 - 4,08 \times 0,8 - 0,024 = 3,98\%$$

Equação 4.28

A portlandite consumida na reação de carbonatação foi calculada da mesma forma já apresentada para o caso da argamassa de referência (*Equação 4.21*).

$$T_{Ca(OH)_2} \text{ carbonatado (\%)} = 3,98 \times \frac{74}{100} = 2,95\%$$

Equação 4.29

Assumindo que a reação de hidratação ocorre na mesma proporção que na argamassa de referência e que, portanto, o teor de total de portlandite será o mesmo, apenas dependendo do teor de cal na argamassa, tem-se:

$$T_{Ca(OH)_2} \text{ total teórico (\%)} = T_{Ca(OH)_2} \text{ total arg. ref}^a \times \text{Teor de cal na arg} = 6,52 \times 0,8 = 5,21\% \quad \text{Equação 4.30}$$

$$T_{Ca(OH)_2} \text{ produzido (\%)} = T_{Ca(OH)_2} \text{ total teórico} - T_{Ca(OH)_2} \text{ NHL}3.5 \times 0,8 = 5,21 - 4,97 \times 0,8 = 1,24\% \quad \text{Equação 4.31}$$

O teor de portlandite consumida na reação pozolânica é calculado pela *Equação 4.32*.

$$\begin{aligned} T_{Ca(OH)_2} \text{ consumido r. pozolânica (\%)} &= T_{Ca(OH)_2} \text{ total teórico} - T_{Ca(OH)_2} \text{ livre} - T_{Ca(OH)_2} \text{ carbonatado} \\ &= 5,21 - 0,86 - 2,95 = 1,40\% \end{aligned} \quad \text{Equação 4.32}$$

Neste caso além das taxas de carbonatação e hidratação é ainda necessário calcular a de reação pozolânica. A taxa de hidratação mantém-se igual à da argamassa de referência porque se assumiu que a reação ocorria sempre na mesma proporção (*Equação 4.25*).

$$\text{Taxa}_{\text{carbonatação}} (\%) = \frac{T_{Ca(OH)_2} \text{ carbonatado}}{T_{Ca(OH)_2} \text{ total}} \times 100 = \frac{2,95}{5,21} \times 100 = 56,53\% \quad \text{Equação 4.33}$$

$$\text{Taxa}_{\text{r.pozolânica}} (\%) = \frac{T_{Ca(OH)_2} \text{ consumido r. pozolânica}}{T_{Ca(OH)_2} \text{ total}} \times 100 = \frac{1,40}{5,21} \times 100 = 26,91\% \quad \text{Equação 4.34}$$

Apresentação e análise de resultados

Nas *Figuras 4.96 e 4.97* são apresentadas curvas dTG das várias composições sujeitas a cura H aos 28 dias e 90 dias, respetivamente. Nas curvas é possível identificar as argamassas que terão maior ou menor proporção de portlandite livre e também as que terão maior ou menor teor de calcite.

Aos 28 dias, a argamassa de referência é a que apresenta maior teor de calcite, o que seria expectável uma vez que não sofre reação pozolânica. A argamassa com apenas 5% de T em substituição de cal tem maior teor de portlandite livre, já a argamassa NHL_10T+10Mk apresenta menor teor de portlandite livre; como esta argamassa não apresenta um teor de calcite superior ao das restantes composições, depreende-se que a portlandite possa ter sido consumida na reação pozolânica. Aos 90 dias, os teores de calcite não diferem muito, ao contrário dos de portlandite; é possível identificar nas curvas que o teor de portlandite da argamassa de referência aumentou, pelo que se conclui que ocorreram reações de hidratação. Por outro lado, a NHL_10T+10Mk apresenta neste caso uma

linha praticamente horizontal no intervalo 400-500°C o que indica que a portlandite terá sido completamente consumida.

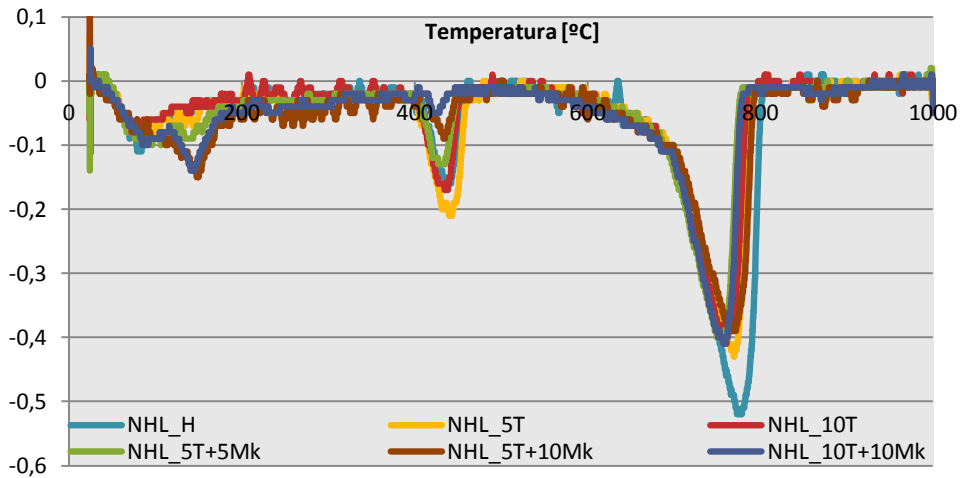


Figura 4.96 – Curvas dTG das argamassas da cura H aos 28 dias

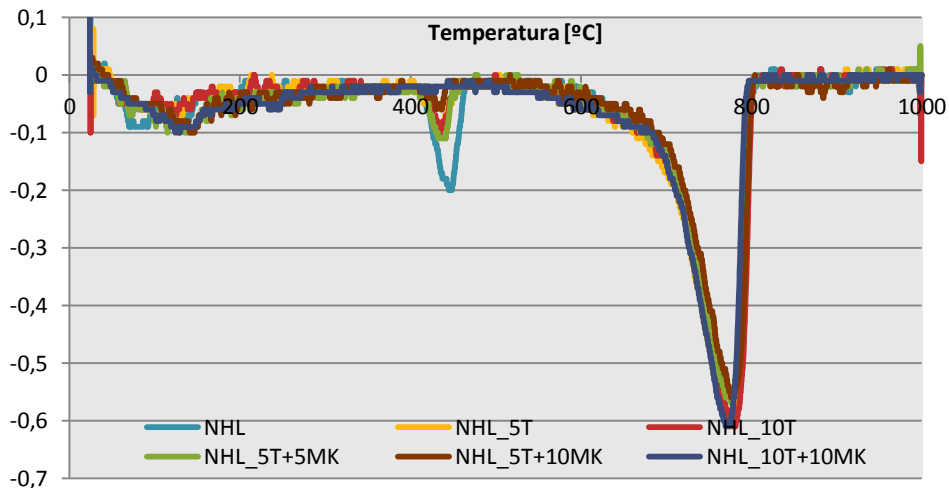


Figura 4.97 – Curvas dTG das argamassas da cura H aos 90 dias

Nas Figuras 4.98 e 4.99 são apresentadas curvas dTG das composições expostas a cura St aos 28 dias e 90 dias, respetivamente. Aos 28 dias, comparativamente às argamassas da cura H, verifica-se que os teores de portlandite são menores. É ainda possível observar que as argamassas com Mk apresentam menor calcite do que as restantes composições, o que indicia maior taxa de reação pozolânica, como seria expectável. Aos 90 dias praticamente não se verifica a existência de portlandite livre nas composições; as argamassas com 10% de Mk são as que apresentam menores teores de calcite, verificando-se que a composição NHL_5T+10Mk tem um teor de calcite bastante inferior ao das restantes composições.

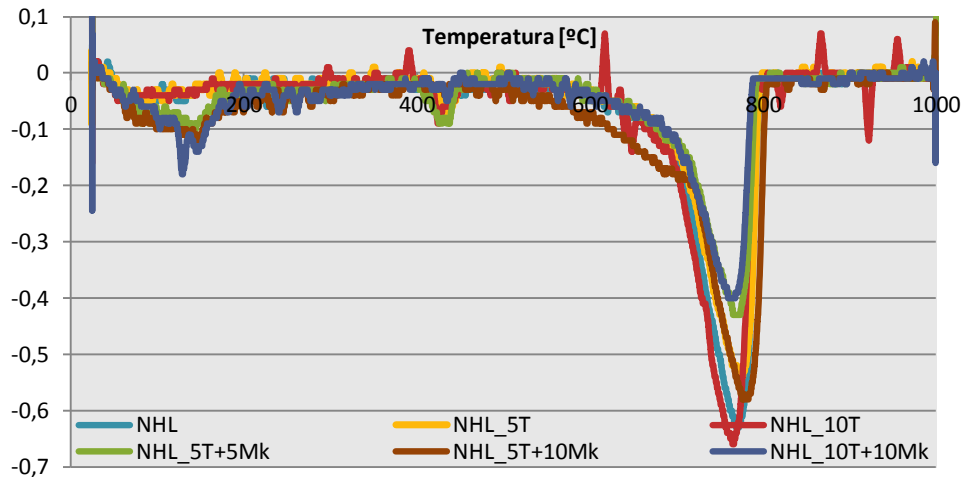


Figura 4.98 – Curvas dTG das argamassas da cura St aos 28 dias

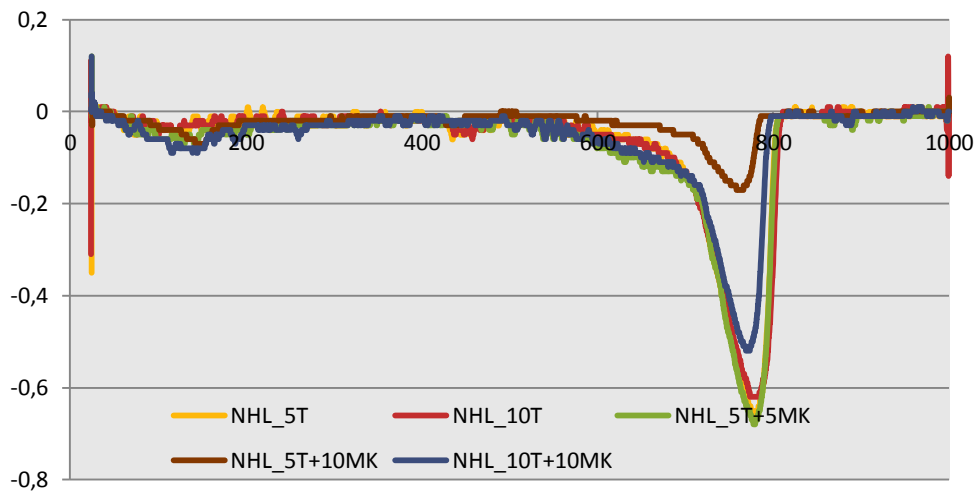


Figura 4.99 – Curvas dTG das argamassas da cura St aos 90 dias

A cura SP, representada aos 28 e 90 dias nas Figuras 4.100 e 4.101, apresenta aos 28 dias teores muito baixos de portlandite, à exceção da argamassa de referência. É ainda possível observar que a argamassa NHL_10T+10Mk não apresenta portlandite logo aos 28 dias. Como a mesma composição também apresenta o menor teor de calcite, deduz-se que a maioria da portlandite foi consumida em reações pozolânicas. Aos 90 dias, à semelhança da cura St, a portlandite é inexistente nas composições com Mk e o seu teor muito baixo no caso das outras composições. Nesta idade mais avançada a tendência da calcite é semelhante à dos 28 dias de idade.

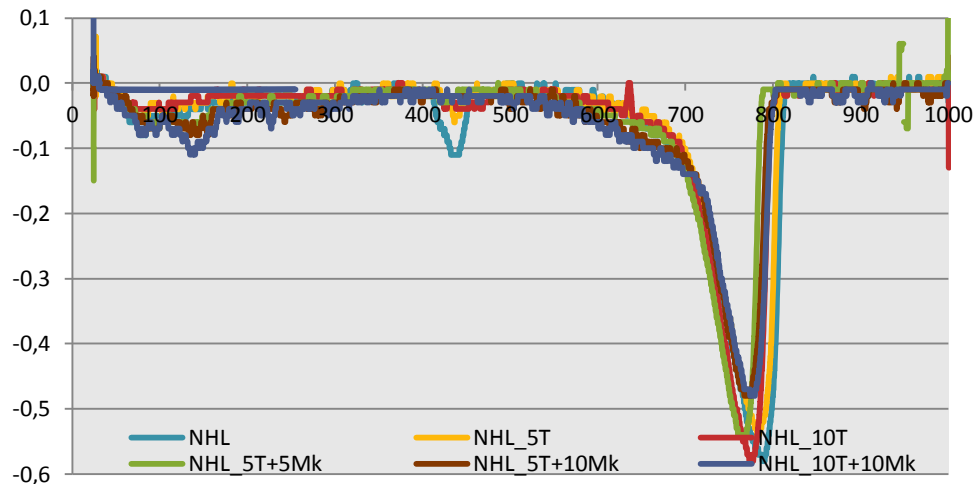


Figura 4.100 – Curvas dTG das argamassas da cura SP aos 28 dias

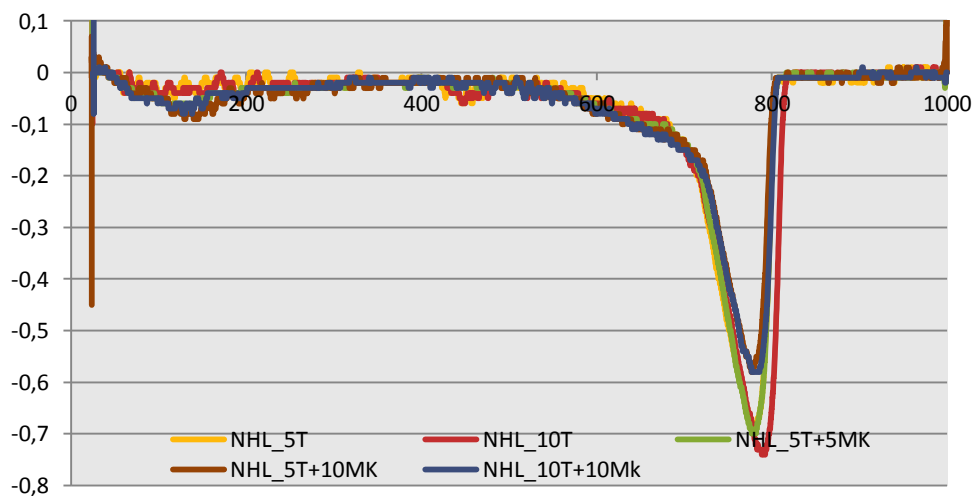


Figura 4.101 – Curvas dTG das argamassas da cura SP aos 28 dias

No Quadro 4.15 são apresentadas as variações de massa obtidas pela análise das curvas TG, para cada composição, de cada condição de cura e nas duas idades em estudo.

No Quadro 4.16 são apresentadas as taxas de hidratação correspondentes a cada uma das três condições de cura aos 28 dias e ainda da cura H aos 90 dias. Apesar das diferenças entre os valores da taxa de hidratação nas três condições de cura não serem significativas, as argamassas sujeitas a cura H apresentaram uma taxa inferior à das argamassas sujeitas às restantes condições de cura em estudo. Como as argamassas nesta condição de cura estão expostas a teores de humidade muito elevados seria expectável que as reações de hidratação fossem beneficiadas e que os teores de portlandite produzida fossem bastante superiores. No caso das argamassas com pozolanas, para permitir os cálculos, colocou-se por hipótese que a reação de hidratação acontecia sempre na mesma proporção numa mesma cura em função da respetiva argamassa de referência. Tal hipótese poderá não corresponder exatamente à realidade. Já no caso das argamassas de referência os valores resultantes de portlandite produzida resultaram diretamente da diferença entre os parâmetros medidos na análise ATG à argamassa e à cal, pelo que correspondem à realidade. Assim, o facto de

na cura H se ter medido menor teor de portlandite poderá ser explicado por uma possível lixiviação da argamassa, fenómeno que é comum em provetes de betão expostos a ambientes de elevada humidade relativa (cerca de 95%).

Quadro 4.15 – Variações de massa nas diversas gamas de temperatura, para as argamassas aos 28 e 90 dias

	28 dias			90 dias		
	T _{amb} a 200°C	400 a 500°C	500 a 850°C	T _{amb} a 200°C	400 a 500°C	500 a 850°C
NHL_H	0,68	0,61	4,18	0,74	0,68	4,48
NHL_5T_H	0,72	0,84	3,23	0,59	0,34	5,21
NHL_10T_H	0,6	0,61	3,1	0,58	0,33	4,99
NHL_5T+5Mk_H	0,87	0,5	2,98	0,8	0,4	4,53
NHL_5T+10Mk_H	1,11	0,33	3,31	0,66	0,23	4,32
NHL_10T+10Mk_H	1,05	0,21	3,2	0,82	0	4,86
NHL_St	0,46	0,3	4,96	-	-	-
NHL_5T_St	0,40	0,22	4,32	0,37	0,28	5,21
NHL_10T_St	0,5	0,42	3,52	0,35	0,25	5,36
NHL_5T+5Mk_St	0,84	0,34	3,49	0,55	0	5,81
NHL_5T+10Mk_St	1,04	0,23	3,23	1,15	0,3	3,62
NHL_10T+10Mk_St	0,99	0,19	3,36	0,71	0	4,46
NHL_SP	0,55	0,4	4,83	-	-	-
NHL_5T_SP	0,40	0,18	4,34	0,31	0,31	5,6
NHL_10T_SP	0,37	0,26	4,37	0,38	0,28	6,4
NHL_5T+5Mk_SP	0,63	0,14	4,1	0,58	0	5,71
NHL_5T+10Mk_SP	0,66	0	4,12	0,6	0	4,94
NHL_10T+10Mk_SP	0,87	0	4,41	0,63	0	5,34

Quadro 4.16 – Taxas de hidratação nas diversas condições de cura aos 28 e 90 dias

Taxa de hidratação [%]			
28 dias			90 dias
Cura St	Cura SP	Cura H	Cura H
24,13	26,29	23,69	31,96

Aos 90 dias, como não existiam valores para as argamassas de referência não foi possível prosseguir os cálculos e não se obtiveram as taxas das diversas reações. Assim, apesar de não existir termo de comparação com outras condições de cura, verifica-se que a taxa de hidratação nas argamassas sujeitas a cura H aumenta, pelo que se conclui que as reações de hidratação prosseguem com a evolução da idade.

Na *Figura 4.102* são apresentadas as taxas de carbonatação, portlandite livre e reação pozolânica das diversas composições/curas. A reação de carbonatação é predominante na generalidade das argamassas. As argamassas da cura H apresentam menor taxa de carbonatação, o que já era expectável dado que a presa das argamassas ocorre em ambiente de elevada humidade, que beneficia reações pozolânicas e de hidratação e dificulta o acesso de dióxido de carbono. A cura H apresenta aos 28 dias maior teor de portlandite livre, sobretudo nas argamassas sem Mk e na NHL_5T+5Mk. As composições com Mk são as que apresentam maior taxa de reação pozolânica, à

exceção da NHL_10T+10Mk_SP que apresenta uma taxa de carbonatação muito elevada sem portlandite livre e com uma taxa de reação pozolânica inferior a 10%.

As várias taxas foram calculadas em função do teor total teórico de portlandite na argamassa. No entanto, esse valor depende da hipótese assumida de que a produção de portlandite na hidratação ocorrerá sempre proporcionalmente à da argamassa de referência de cada cura.

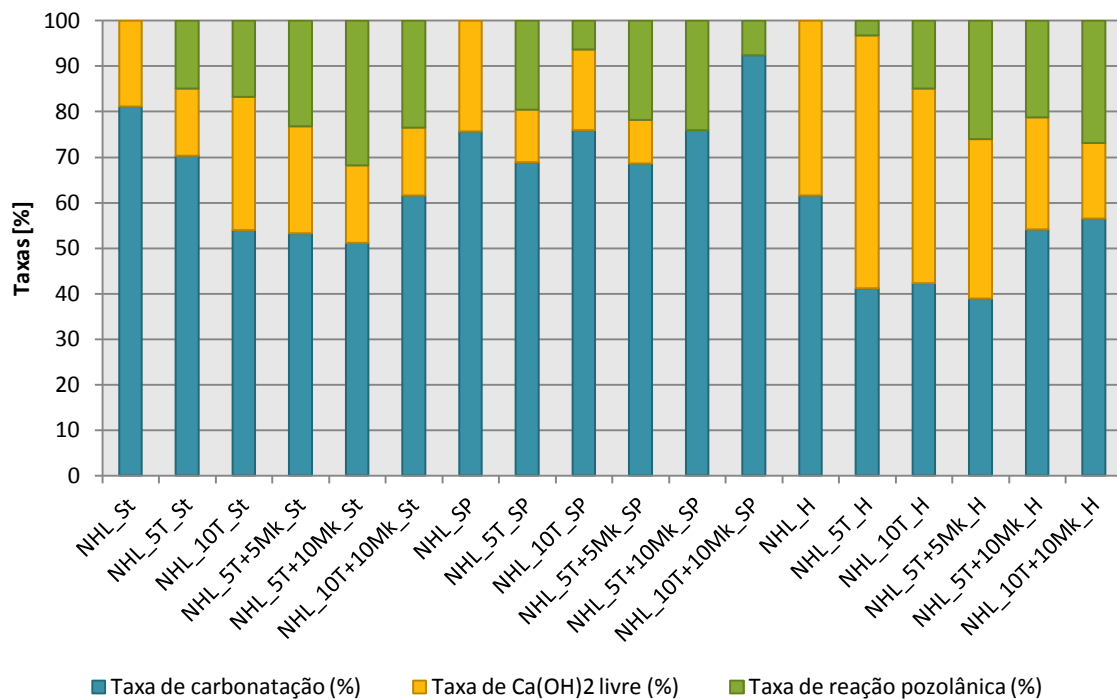


Figura 4.102 – Taxas de carbonatação, Ca(OH)_2 livre e de reação pozolânica

Na Figura 4.103 são apresentadas as taxas de carbonatação, portlandite livre e reação pozolânica das composições expostas a cura H, aos 90 dias de idade. À exceção da NHL_10T+10Mk todas as argamassas apresentam ainda portlandite livre. Verifica-se que a reação de carbonatação torna-se mais predominante com a evolução da idade e que nas argamassas com T deixa de ocorrer reação pozolânica. Nas composições com Mk, a reação pozolânica também é quase inexistente, pelo que se conclui que o Mk é uma pozolana instável, isto é, apesar de inicialmente ser muito reativo e consumir um teor considerável de portlandite, com o avançar da idade ela perde a influência no processo de endurecimento da argamassa, predominando nesse caso as reações de carbonatação e de hidratação, cujas taxas aumentaram dos 28 para os 90 dias.

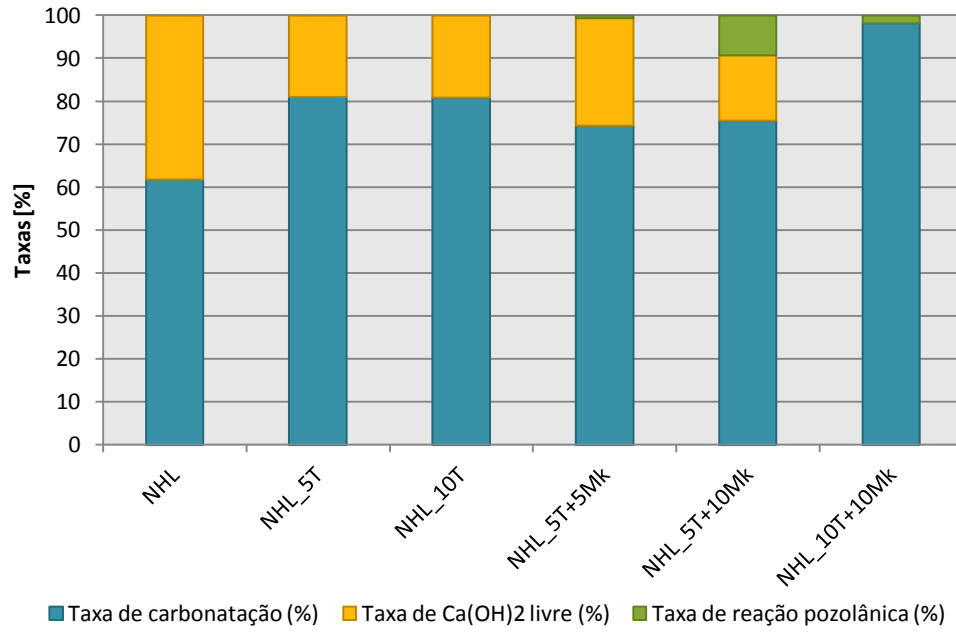


Figura 4.103 – Taxas de carbonatação, Ca(OH)₂ livre e de reação pozolânica da cura H aos 90 dias

5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1. Quadros síntese

No Quadro 5.1 é apresentado um quadro síntese com os valores médios e desvios padrão do módulo de elasticidade dinâmico, das resistências à tração e à compressão nas idades estudadas.

Quadro 5.1 – Valores de resistências mecânicas aos 28 e 90 dias

Cura	Composição	Ed (MPa)		Rt (MPa)				Rc (MPa)			
				28 dias		90 dias		28 dias		90 dias	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Standard	NHL	3548	49	0,42	0,04	-	-	1,00	0,10	-	-
	NHL_5T	3662	200	0,54	0,07	0,68	0,17	0,95	0,15	0,95	0,05
	NHL_10T	3277	156	0,45	0,04	0,71	0,06	0,88	0,04	0,86	0,12
	NHL_5T+5Mk	3086	222	0,52	0,04	0,67	0,08	2,19	0,43	2,06	0,30
	NHL_5T+10Mk	3552	223	0,57	0,09	0,74	0,06	3,04	0,12	2,74	0,19
	NHL_10T+10Mk	3447	721	0,47	0,04	0,67	0,14	2,73	0,26	2,70	0,30
Spray	NHL	3758	293	0,56	0,01	-	-	1,11	0,02	-	-
	NHL_5T	3634	78	0,43	0,04	0,41	0,06	1,07	0,07	1,16	0,14
	NHL_10T	3670	231	0,38	0,03	0,43	0,04	1,03	0,11	1,04	0,10
	NHL_5T+5Mk	5277	174	0,76	0,06	0,73	0,10	2,18	0,15	1,99	0,13
	NHL_5T+10Mk	5422	75	0,76	0,04	0,79	0,05	2,37	0,25	2,44	0,27
	NHL_10T+10Mk	5186	101	0,80	0,03	0,70	0,02	1,97	0,44	2,29	0,32
Humid	NHL	5960	150	0,77	0,02	1,48	0,10	1,81	0,20	2,86	0,35
	NHL_5T	5447	60	0,71	0,08	0,87	0,19	1,33	0,05	2,58	0,48
	NHL_10T	4821	438	0,62	0,08	0,85	0,15	1,26	0,08	2,16	0,31
	NHL_5T+5Mk	8300	311	0,81	0,13	0,85	0,16	2,61	0,06	4,23	0,14
	NHL_5T+10Mk	9529	165	0,72	0,11	1,00	0,14	3,03	0,35	4,80	0,68
	NHL_10T+10Mk	9610	34	0,70	0,09	0,80	0,13	3,32	0,13	3,95	0,70

No Quadro 5.2 é apresentado um quadro síntese com os valores médios e desvios padrão do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico. No Quadro 5.3 estão representados os valores médios e desvios padrão da taxa de secagem e índice de secagem. No Quadro 5.4 são apresentados os resultados de porosidade, pelo método da pesagem hidrostática (aos 28 e 90 dias) e pelo método da porosimetria de mercúrio, e ainda os resultados da condutibilidade térmica realizado aos provetes.

Quadro 5.2 – Resultados do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico aos 28 e 90 dias

Cura	Composição	CC (kg/m ² .min ^{0,5})				VA (kg/m ²)			
		28 dias		90 dias		28 dias		90 dias	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Standard	NHL	3,5	0,3	-	-	21,7	1,7	-	-
	NHL_5T	3,1	0,2	3,4	0,1	19,2	0,6	18,8	2,1
	NHL_10T	3,5	0,1	3,7	0,1	20,1	0,7	19,5	0,7
	NHL_5T+5Mk	2,8	0,1	3,5	0,1	21,2	0,8	22,2	2,4
	NHL_5T+10Mk	2,3	0,2	3,0	0,2	22,7	1,1	21,6	2,7
	NHL_10T+10Mk	2,7	0,1	3,1	0,1	22,5	2,9	22,0	2,6

Cura	Composição	CC (kg/m ² .min ^{0,5})				VA (kg/m ²)			
		28 dias		90 dias		28 dias		90 dias	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Spray	NHL	2,9	0,3	-	-	19,4	1,7	-	-
	NHL_5T	2,9	0,1	3,0	0,1	18,0	0,5	17,8	1,6
	NHL_10T	3,0	0,1	3,3	0,1	17,7	1,0	18,9	1,2
	NHL_5T+5Mk	2,5	0,1	2,6	0,2	18,6	0,7	19,2	0,4
	NHL_5T+10Mk	2,5	0,1	2,4	0,1	20,3	1,0	18,9	0,7
	NHL_10T+10Mk	2,4	0,1	2,7	0,2	19,6	0,5	18,8	0,8
Humid	NHL	2,1	0,1	2,0	0,1	17,4	0,8	18,1	0,5
	NHL_5T	2,9	0,2	2,3	0,1	21,3	0,4	19,3	2,3
	NHL_10T	3,0	0,1	2,5	0,4	20,7	0,5	20,3	0,9
	NHL_5T+5Mk	1,8	0,0	1,8	0,1	19,4	0,6	18,7	2,4
	NHL_5T+10Mk	1,7	0,1	1,6	0,1	19,4	0,9	20,0	0,6
	NHL_10T+10Mk	1,7	0,1	1,7	0,1	19,8	0,4	20,0	3,4

Quadro 5.3 – Resultados da taxa de secagem e do índice de secagem aos 28 e 90 dias

Cura	Composição	TS (kg/m ² .h)				IS			
		28 dias		90 dias		28 dias		90 dias	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Standard	NHL	0,12	0,01	-	-	0,37	0,03	-	-
	NHL_5T	0,17	0,03	0,13	0,03	0,31	0,03	0,27	0,03
	NHL_10T	0,16	0,01	0,11	0,01	0,30	0,03	0,27	0,03
	NHL_5T+5Mk	0,21	0,01	0,11	0,01	0,27	0,04	0,27	0,09
	NHL_5T+10Mk	0,11	0,04	0,15	0,02	0,42	0,08	0,27	0,04
	NHL_10T+10Mk	0,13	0,02	0,13	0,01	0,38	0,07	0,26	0,07
Spray	NHL	0,13	0,01	-	-	0,44	0,11	-	-
	NHL_5T	0,11	0,01	0,09	0,02	0,34	0,04	0,29	0,01
	NHL_10T	0,16	0,16	0,09	0,01	0,33	0,01	0,27	0,04
	NHL_5T+5Mk	0,13	0,13	0,13	0,01	0,29	0,02	0,28	0,03
	NHL_5T+10Mk	0,14	0,00	0,09	0,01	0,43	0,11	0,28	0,02
	NHL_10T+10Mk	0,14	0,00	0,09	0,01	0,41	0,08	0,26	0,05
Humid	NHL	0,12	0,01	0,08	0,02	0,31	0,02	0,34	0,03
	NHL_5T	0,15	0,01	0,08	0,01	0,26	0,05	0,29	0,10
	NHL_10T	0,11	0,01	0,13	0,00	0,27	0,09	0,28	0,04
	NHL_5T+5Mk	0,18	0,04	0,08	0,02	0,32	0,04	0,31	0,03
	NHL_5T+10Mk	0,18	0,04	0,09	0,03	0,43	0,07	0,31	0,12
	NHL_10T+10Mk	0,11	0,01	0,14	0,01	0,43	0,04	0,30	0,02

Quadro 5.4 – Resultados de porosidade (por método hidrostático e MIP) e condutibilidade térmica aos 28 e 90 dias

Cura	Composição	Pab (%)				P _{MIP} (%)	λ (W/(m°C))	
		28 dias		90 dias			Média	DP
		Média	D.P.	Média	D.P.			
Standard	NHL	26,5	0,5	-	-	-	0,79	0,04
	NHL_5T	24,8	0,6	25,3	0,1	27,7	0,95	0,06
	NHL_10T	24,2	1,2	25,5	0,6	-	0,84	0,03
	NHL_5T+5Mk	26,8	1,2	26,8	0,1	27,2	0,96	0,06
	NHL_5T+10Mk	26,8	0,4	27,2	0,4	29,8	0,91	0,03
	NHL_10T+10Mk	27,1	0,4	27,2	0,4	28,7	0,90	0,02

Cura	Composição	P _{ab} (%)				P _{MIP} (%)	λ (W/(m°C))	
		28 dias		90 dias			Média	DP
		Média	DP	Média	DP			
Spray	NHL	22,7	0,4	-	-	29,0	0,92	0,03
	NHL_5T	22,8	0,5	23,6	0,5	27,4	0,96	0,05
	NHL_10T	23,2	0,4	24,7	0,4	27,0	1,03	0,05
	NHL_5T+5Mk	24,7	0,1	24,9	0,4	26,7	0,99	0,02
	NHL_5T+10Mk	25,7	0,2	25,5	0,4	27,6	1,03	0,05
	NHL_10T+10Mk	31,2	0,2	25,7	0,1	28,9	0,92	0,06
Humid	NHL	23,2	0,3	23,6	0,1	27,5	1,11	0,03
	NHL_5T	19,1	0,0	25,7	0,6	26,9	0,96	0,06
	NHL_10T	25,5	1,4	26,3	1,2	27,6	0,91	0,10
	NHL_5T+5Mk	25,7	0,8	26,6	0,5	26,1	1,07	0,06
	NHL_5T+10Mk	24,0	0,9	26,7	0,9	26,0	1,03	0,02
	NHL_10T+10Mk	23,2	0,3	26,7	0,2	27,2	0,99	0,01

Nos Quadros 5.5 e 5.6 estão representados os resultados dos ensaios realizados ao revestimento dos tijolos cerâmicos. No primeiro pode-se consultar os resultados de porosidade obtida por porosimetria de mercúrio, a condutibilidade térmica, a velocidade de propagação de ultra-sons e a dureza superficial pelos métodos do durómetro e do esclerómetro. No segundo quadro são apresentados os resultados do ensaio dos tubos de Karsten, nomeadamente, a quantidade total de água absorvida após 60 minutos de ensaio e o coeficiente de absorção aos 5 minutos de ensaio, apresentado por permitir inferir qualitativamente a velocidade inicial de absorção das várias composições.

Quadro 5.5 – Resultados de porosidade, condutibilidade térmica, velocidade de ultra-sons e dureza superficial do revestimento dos tijolos

Argamassa	P _{MIP} (%)	λ (W/(m°C))		V _u (m/s)		Dureza superficial			
		Média	DP	Média	DP	Durómetro (Shore A)		Esclerómetro (Vickers)	
						Média	DP	Média	DP
NHL	23,9	0,76	0,17	1262	119	74,7	8,5	54,9	12,8
NHL_5T	25,9	0,73	0,09	1412	186	70,6	12,3	59,2	5,5
NHL_10T	24,1	0,82	0,14	1628	615	73,1	7,3	46,7	2,9
NHL_5T+5Mk	25,3	0,62	0,10	1411	87	67,0	8,7	48,5	0,7
NHL_5T+10Mk	23,5	0,45	0,12	1137	215	65,1	15,7	48,8	7,4
NHL_10T+10Mk	24,6	0,48	0,12	1052	240	55,7	11,0	51,1	7,2

Quadro 5.6 – Resultados do ensaio dos tubos de Karsten ao revestimento dos tijolos

Argamassa	Quantidade total de água absorvida aos 60 min (cm ³)		Coeficiente de absorção aos 5 min (kg/(m ² .min ^{0,5}))	
	Média	DP	Média	DP
NHL	15,97	1,21	2,36	0,09
NHL_5T	15,83	2,46	2,77	0,21
NHL_10T	15,85	2,05	2,53	0,15
NHL_5T+5Mk	18,67	2,84	3,20	0,40
NHL_5T+10Mk	19,73	3,15	3,94	1,09
NHL_10T+10Mk	16,60	0,85	3,35	0,07

5.2. Avaliação das tendências

Neste subcapítulo é feita uma revisão das tendências verificadas na análise de resultados obtidos. Primeiramente são comentadas as tendências de cada uma das composições com substituições de cal por T ou por T e Mk comparativamente à respectiva argamassa de referência em cada cura e por cada parâmetro analisado. Posteriormente são analisadas comparativamente as tendências entre todas as composições. Também são comparados os resultados, para cada composição entre as diferentes curas e finalmente é feita uma revisão em relação à evolução da idade.

Tendo em conta o objetivo de aplicação das argamassas em análise em reabilitação de rebocos e tratamento de juntas de alvenarias, se estas forem antigas, consideram-se adequados valores de:

- Ed baixos, de forma a garantir a deformabilidade da argamassa;
- R_t e R_c não demasiado elevados, para que a argamassa não seja propícia à fendilhagem e tenha resistências na mesma ordem de grandeza que o suporte;
- CC e VA o menor possíveis, para que a argamassa absorva a menor quantidade de água e mais lentamente;
- TS elevada e IS menor possível, para que a secagem seja mais rápida no início e se possa concluir facilmente a globalidade do processo;
- Pab dá uma ideia da compacidade das argamassas e, juntamente com a porosimetria pode ajudar a compreender os restantes resultados;
- λ menor possível, o que significa que a transmissão de calor será menor;
- Variação de massa devido ao ataque por sulfatos o menor possível, indiciando boa resistência em zonas contaminadas.

5.2.1. Entre composições

Em relação ao Ed, verifica-se em todas as condições de cura que as argamassas com apenas T em substituição de NHL apresentam valores de Ed inferiores aos da respectiva argamassa de referência. Já as argamassas com Mk, e à exceção da NHL_5T+5Mk_St, apresentam valores superiores aos da argamassa de referência e, portanto, também superiores aos das argamassas com apenas T. Estas últimas indiciam ser assim mais adequadas por serem mais deformáveis.

Os valores de R_t das argamassas com substituições, na cura St, são superiores aos da argamassa de referência. Já no caso da cura H, R_t é menor em todas as composições, exceto na NHL_5T+5Mk. No caso da cura SP, nas argamassas com Mk, ao contrário do que acontece nas com apenas T em substituição de NHL, os valores de R_t são superiores.

Os valores de R_c nas argamassas com apenas T são menores do que na argamassa de referência; já nas com Mk, são superiores para qualquer uma das curas estudadas. Assim, no caso de adoção da argamassa como substituição de rebocos antigos, provavelmente as argamassas com apenas resíduo cerâmico serão as mais adequadas, pois apresentam R_c mais baixos.

Em relação ao CC, as argamassas com Mk apresentam, em todas as curas, valores inferiores aos da argamassa de referência, à exceção da NHL_5T+5Mk_SP, sendo portanto as argamassas que absorvem água mais lentamente, ao contrário do que ocorre nas argamassas com apenas T.

No caso de VA, todas as composições sujeitas a cura H apresentam valores superiores aos da respectiva argamassa de referência. Nas restantes curas as argamassas com apenas T e as com 5% de Mk absorvem menor quantidade de água do que a argamassa de referência – contrariamente ao que se verifica no caso das argamassas com 10% de Mk.

Na análise de TS verifica-se que, na generalidade das composições das três curas, a secagem inicial é mais rápida que nas respectivas argamassas de referência. As exceções verificam-se nas argamassas NHL_5T_SP, NHL_5T+10Mk_St, NHL_10T_H e NHL_10T+10Mk_H.

Quanto à globalidade do processo de secagem, avaliado por IS, verifica-se que na cura SP a secagem é mais facilitada em todas as argamassas comparativamente à argamassa de referência; já nas curas H e St, a secagem nas argamassas com Mk é mais lenta em relação às argamassas de referência e também em relação às com apenas T. É exceção a este caso a NHL_5T+5Mk_St.

Em relação a Pab, os valores são muito semelhantes entre as diversas composições; no entanto as argamassas com Mk sujeitas às curas SP e H e a NHL_10T_H apresentam Pab superior à respectiva argamassa de referência, ao contrário do que se verifica no caso das argamassas com apenas T da cura St e na NHL_5T_H.

A transmissão térmica nas curas SP e St é superior em todas as composições quando comparadas com as argamassas de referência. Na cura H verifica-se o contrário.

Em relação à variação de massa ao vigésimo ciclo do ensaio de resistência ao ataque de sais, na cura St, a argamassa de referência apresenta uma grande perda de massa; apenas a NHL_10T+10Mk apresenta uma perda de massa superior. No caso das restantes curas, as argamassas com 5% de T em substituição de NHL apresentam perdas de massa semelhantes às das argamassas de referência. As restantes composições apresentam maiores perdas de massa.

5.2.2. Entre curas

Na avaliação de Ed, a cura H apresenta os valores mais elevados, indiciando que as argamassas têm maior rigidez e são menos adequadas a alvenarias antigas. Já a cura St apresenta os valores de Ed mais baixos.

Em relação a Rt, as argamassas sujeitas a cura húmida apresentam valores de Rt superiores, à exceção das argamassas com 10% de Mk que apresentam valores superiores quando sujeitas a cura SP. Já a cura St apresenta os menores valores de Rt, exceto no caso das argamassas com apenas T em substituição de NHL.

No caso de Rc, as argamassas expostas a condição de cura H apresentam os valores de Rc mais elevados, exceto no caso da NHL_5T+10Mk que, quando sujeita a cura St, apresenta valor de Rc ligeiramente superior. As argamassas de referência e com apenas T sujeitas a cura St apresen-

tam os valores mais baixos de R_c ; no entanto nas argamassas com Mk, é na cura SP que se verificam os valores inferiores.

As argamassas sujeitas a cura H apresentam em todas as composições uma absorção de água por capilaridade mais lenta, avaliada pelos CC apresentarem valores mais baixos. Já na cura St, a absorção de água é mais rápida, à exceção da argamassa NHL_5T+10Mk que tem uma absorção mais rápida quando sujeita a cura SP.

As composições sujeitas a cura SP são na generalidade as que absorvem menor quantidade de água, à exceção da argamassa de referência e da NHL_5T+10Mk sujeitas a cura H. Já as composições sujeitas a cura St absorvem maior quantidade de água, à exceção das argamassas com apenas T, que absorvem mais água quando sujeitas a cura H.

Na secagem inicial das argamassas, avaliada por TS, a generalidade das composições quando expostas a cura SP apresentam uma secagem inicial mais rápida, exceto nas composições NHL_5T e NHL_5T+5Mk em que se verifica, nesta cura, uma secagem mais lenta e quando sujeitas a curas St, uma secagem mais rápida. A NHL_5T+10Mk apresenta a secagem inicial mais lenta quando sujeita a cura St. Já a argamassa de referência, a NHL_10T e a NHL_10T+10Mk quando expostas a cura H têm a secagem mais demorada.

Em relação à secagem global das argamassas, as argamassas com Mk têm uma secagem mais rápida quando sujeitas a cura St, mas a argamassa de referência e as com apenas T são mais rápidas a secar quando sujeitas a cura H. A generalidade das argamassas sujeitas a cura SP apresentam uma secagem global lenta, ao contrario do verificado na secagem inicial e excetuando o caso das composições NHL_5T+5Mk e NHL_10T+10Mk, cuja secagem é mais demorada quando expostas à cura H.

Em relação à porosidade aberta, as argamassas sujeitas a cura St apresentam maior percentagem de porosidade, o que não se verifica no caso da NHL_10T, que tem maior Pab quando sujeita a cura H, e no caso da NHL_10T+10Mk que tem maior Pab na cura SP. Os menores valores de Pab são verificados no caso da cura H, nas composições com 10% de Mk e na NHL_10T, e no caso da cura SP, na argamassa de referência, na NHL_10T e na NHL_5T+5Mk.

Em relação à condutibilidade térmica, a transmissão de calor é menor nas argamassas sujeitas a cura St. A argamassa NHL_10T, quando sujeita a cura St, é a que apresenta maior λ . Já a argamassa de referência, a NHL_5T+5Mk e a NHL_10T+10Mk na cura H são as que transmitem com maior facilidade calor. A NHL_5T e NHL_5T+10Mk apresentam valores similares.

Em relação à percentagem total de massa perdida na conclusão do ensaio de resistência ao ataque por sais, verifica-se que a cura SP é a mais positiva, uma vez que as composições sujeitas a esta cura, quando comparadas com as mesmas composições mas sujeitas às outras curas, são as que perdem menos massa. Por outro lado, as argamassas de referência e NHL_5T sujeitas a curas St perdem a maior percentagem de massa. Já a NHL_10 e as argamassas com Mk, quando sujeitas a cura H apresentam o pior comportamento, chegando as com 10% de Mk a extinguirem-se. A NHL_10T+10Mk quando sujeita a cura St também se extingue.

5.2.3. *Entre idades*

Em relação à evolução com a idade, no caso da análise de R_t os valores aumentam tanto na cura St quanto na H. Já na cura SP os valores mantem-se similares em todas as composições à exceção da NHL_10T+10Mk, em que R_t diminui. No caso de R_c , nas curas St e SP os valores mantem-se semelhantes entre as duas idades, excetuando o caso da NHL_5T+10Mk_St, em que R_c diminui e da NHL_10T+10Mk, em que R_c aumenta. Na cura H verifica-se o aumento de R_c em todas as composições.

As argamassas, na sua maioria, apresentam velocidades de absorção de água semelhantes ou inferiores entre as duas idades. As exceções verificam-se nas argamassas com Mk sujeitas a cura St e na NHL_10T+10Mk_SP. Em relação à quantidade de água absorvida, as variações são muito ligeiras, verificam-se algumas argamassas que absorvem menos água aos 90 dias. Já as argamassas que acabam por absorver maior quantidade de água, comparativamente aos 28 dias, são a NHL_5T+5MK_St, a NHL_10T_SP e NHL_5T+5MK_SP.

A secagem inicial na maioria das argamassas torna-se mais lenta com a evolução da idade, salvo a NHL_5T+10Mk_St, a NHL_10T_H e NHL_10T+10Mk_H, que secam mais rapidamente e a NHL_10T+10Mk_St e NHL_5T+5Mk_SP, que apresentam capacidade semelhante de secagem entre as duas idades. No caso do processo global de secagem, a maioria das argamassas apresenta maior facilidade de secagem aos 90 dias do que aos 28, à exceção da argamassa de referência e da com 5% de T quando sujeitas a cura H.

Em relação à porosidade aberta, os valores não variam muito, verificando-se apenas nas argamassas com Mk na cura húmida um aumento das percentagens de Pab.

No que respeita à condutibilidade térmica nas argamassas da cura SP, λ diminui em todas as composições. Na cura St as argamassas NHL_10T e NHL_5T+10Mk apresentam valores similares entre as duas idades e nas restantes a transmissão de calor é menor aos 90 dias de idade. Já no caso da cura H, e à exceção da NHL_10T+10Mk que praticamente não varia, nas restantes composições a λ aumenta.

No caso da análise de perda de massa devido ao ataque por sais, o resultado foi muito positivo com a evolução com a idade visto que a maioria das argamassas perdeu menos massa aos 90 dias de idade, sendo que em algumas composições a diferença até é significativa. A única exceção verificou-se no caso da NHL_5T_H que apresentou um valor ligeiramente superior de perda de massa.

5.2.4. *Cruzamento de resultados*

5.2.4.1 *Propriedades mecânicas*

As propriedades mecânicas de uma argamassa podem ser influenciadas pela sua estrutura porosa e pelas reações de carbonatação, hidratação e pozolânicas que ocorrem durante o seu endurecimento. Pela análise da resistência à compressão concluiu-se que as argamassas da cura H apresentam valores superiores aos das restantes curas e que as argamassas com Mk apresentam valores superiores aos das restantes composições.

As conclusões poderão ser explicadas pelas constatações da distribuição da dimensão de poros: por um lado, a cura H apresentou poros com menores dimensões; por outro lado, os poros das argamassas com Mk apresentam dimensões inferiores aos das restantes composições. Assim, as argamassas com Mk da cura H são que têm uma estrutura porosa mais compacta sendo, consequentemente, as que apresentam resistências à compressão superiores.

Relativamente às reações que ocorrem no endurecimento da argamassa, verificou-se que apesar do processo de carbonatação ser preponderante nas várias composições/curas, a resistência das argamassas da cura H, e sobretudo das com Mk, deve-se principalmente às reações de hidratação e pozolânicas. Apesar da taxa de hidratação calculada na ATG ser inferior à das restantes curas, os difratogramas permitem concluir que as reações de hidratação são dominantes na cura H, uma vez que em qualquer uma das composições se verifica a existência de maior quantidade de portlandite e menor de larnite (*Figuras 4.89 a 4.92 e 5.1*). A reação de hidratação confere resistência à argamassa porque produz CSH, composto que não é detetado no DRX; no entanto, dado que por DRX foi possível confirmar que na cura H ocorre mais reação de hidratação, então também se pode inferir uma maior produção de CSH.

No caso da reação pozolânica, os difratogramas das argamassas com Mk e na cura H apresentam compostos hidratados em maior proporção do que em qualquer outra condição de cura (*Figuras 4.91, 4.92 e 5.1*) e também maior proporção (ou até aparecimento desses compostos) que nas restantes composições. Compostos como o monocarboaluminato, ou o CASH, conferem resistência à argamassa e, como pode ser constatado, formam-se porque o Mk é muito reativo, contrariamente ao T. A sua formação é beneficiada quando os teores de humidade são elevados, portanto numa cura H.

Nas composições sujeitas a cura H verifica-se uma diferença significativa das resistências à compressão entre as argamassas com e sem Mk. Assim considera-se que essa variação é devida à reação pozolânica.

Nas composições com 10% de Mk, a Rc na cura St toma valores próximos aos obtidos na cura H, ligeiramente superiores no caso da NHL_5T+10Mk. Na porosimetria de mercúrio constatou-se que as duas composições com 10% de Mk apresentam um valor significativo de poros na gama de menor dimensão. Por outro lado verifica-se, pelos cálculos da análise ATG, que a taxa de reação pozolânica é tão ou mais elevada nessas composições, que na cura H. Pela DRX constatam-se compostos hidratados em proporções semelhantes às verificadas na cura H, nomeadamente o CASH (*Figura 5.1*).

Aos 90 dias de idade das argamassas, devido à instabilidade do Mk, a reação pozolânica abranda, o que pode ser constatado na *Figura 5.2* pela diminuição da proporção de monocarboaluminato e inexistência de CASH aos 90 dias. Assim, o aumento significativo de resistências deve-se principalmente às reações de carbonatação e de hidratação, uma vez que com a evolução com a idade a calcite aumenta, e a larnite diminui (*Figura 5.2*).

A formação de vaterite nas argamassas com 10% de Mk da cura H aos 28 dias e a sua intensificação aos 90 dias (*Figura 5.2*) também contribuem para as Rc superiores e para o seu aumento com a evolução com a idade, pois este composto compacta a estrutura porosa.

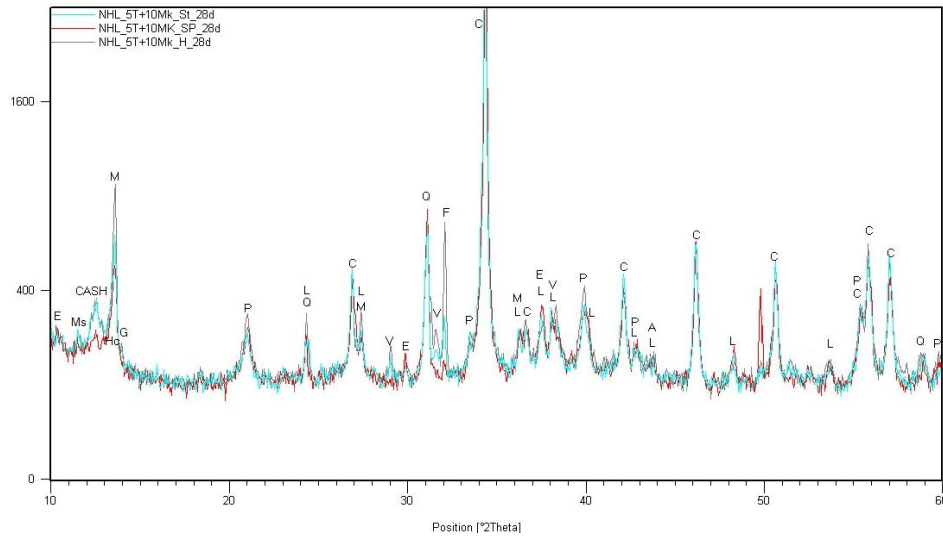


Figura 5.1 – Difratomogramas da NHL_5T+10Mk nas três curas aos 28 dias

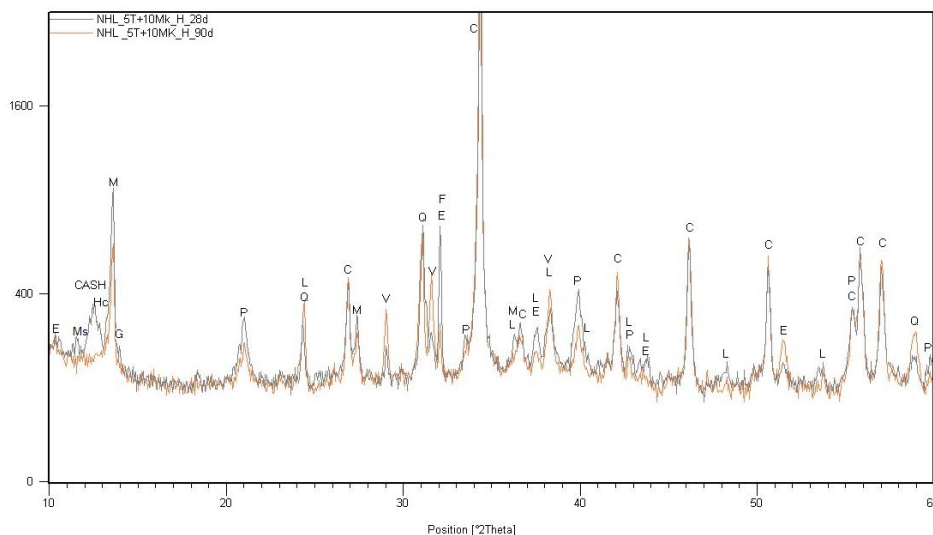


Figura 5.2 – Difratomogramas da NHL_5T+10Mk aos 28 e 90 dias

Comparando os resultados das resistências mecânicas com os de dureza superficial, obtidos pelos métodos do durômetro e do esclerômetro, constatou-se que as tendências são inversas; as argamassas com Mk que são mais resistentes apresentaram tendência a dureza inferior.

5.2.4.2 Comportamento face à água

O comportamento de uma argamassa em relação à água depende essencialmente da sua microestrutura. Pela avaliação dos coeficientes de capilaridade das argamassas concluiu-se que a absorção de água por capilaridade nas argamassas quando sujeitas a cura H é mais lenta do que nas argamassas sujeitas a outras curas. Por outro lado as composições com Mk também são mais lentas a absorver água por capilaridade, comparativamente a outras composições. Assim, as argamassas com Mk e expostas a cura H são as mais lentas no processo. Tal como foi constatado na porosimetria de mercúrio e já referido em relação às propriedades mecânicas, as argamassas sujeitas a cura H apresentam maior volume de poros com menores dimensões e as composições com Mk são as que

apresentam maior volume nas gamas de poros inferiores. A absorção de água é dificultada pela pequena dimensão dos poros; daí a absorção nas argamassas da cura H e sobretudo nas com Mk ser mais lenta. Como os valores de porosidade não variam muito também não se verificam diferenças significativas no valor assintótico.

As composições com apenas resíduo em substituição de cal e as mistas com 5% de Mk, na generalidade dos casos apresentam tendência para um TS superior e IS inferior comparativamente às restantes composições, o que significa que têm uma capacidade de secagem inicial e a longo prazo mais rápida do que a das restantes composições. Tal poderá ser explicado devido a essas argamassas, principalmente as com apenas T, apresentarem poros de maiores dimensões, o que poderá contribuir para facilitar a sua secagem.

Os coeficientes de absorção obtidos no ensaio dos tubos de Karsten são inferiores nas argamassas com T; esses valores são muito próximos da argamassa de referência e significativamente inferiores aos das argamassas com Mk, contrariamente ao constatado no caso do ensaio de absorção por capilaridade.

5.2.4.3 *Comportamento face aos sais*

No ensaio de resistência aos sulfatos verificou-se que as argamassas com Mk, sobretudo em cura H, sofreram uma degradação muito acentuada; a maioria dos provetes degradaram-se totalmente, tendo a sua desagregação começado a ser evidente logo a partir dos primeiros ciclos do ensaio. As argamassas com T em substituição de cal apresentaram, para qualquer cura, resultados mais positivos comparativamente com as argamassas com Mk, não evidenciando degradação, nem variações significativas de massa na maioria dos ciclos do ensaio; as argamassas da cura SP foram as que apresentaram melhor comportamento, não tendo ocorrido degradação total de nenhum provete. Verificou-se ainda um aumento da resistência ao ataque por sais dos 28 para os 90 dias de idade. Com efeito a idade mais avançada, os provetes apresentaram menor grau de degradação; algumas composições não apresentaram quase variações de massa e a degradação das com Mk começou em ciclos mais avançados.

A análise DRX evidenciou a presença de thenardite nas amostras contaminadas por sais, não tendo sido detetada a formação de etringite. Como as argamassas com Mk, e principalmente na cura H, apresentam poros de menores dimensões, a cristalização da thenardite terá originado tensões nos poros que conduziram à fissuração e conseqüente rotura da argamassa. As argamassas com apenas T apresentam poros com dimensões superiores às das argamassas com Mk. Já os poros das argamassas sujeitas a cura SP são os que apresentam maiores dimensões, o que terá permitido melhor acomodar as tensões produzidas pela cristalização da thenardite.

A análise DRX só foi feita às amostras contaminadas resultantes do ensaio aos 90 dias, pelo que não é possível saber o que se passou aos 28 dias para a degradação dos provetes ter sido em maior proporção. Coloca-se a hipótese de formação de etringite nessa idade; no entanto, sem a análise DRX não é possível ter a certeza.

5.2.4.4 DRX e ATG

Verificou-se pela comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos que na ATG existem várias argamassas que não evidenciam a existência de portlandite mas para as quais, através da DRX, a presença de portlandite é indiscutível. Se a verificação fosse ao contrário, poderia ser explicado pela análise ATG ser mais completa e rigorosa e detetar portlandite que a DRX não detetasse. No entanto, neste caso, coloca-se em hipótese ter ocorrido carbonatação da argamassa durante a preparação da amostra para a ATG, visto que a preparação é demorada e a argamassa está durante a preparação exposta ao ar. Na *Figura 5.3* não se deteta a presença de portlandite na argamassa *NHL_10T+10Mk* aos 90 dias, no entanto, no difratograma correspondente, *Figura 5.4*, a sua existência é detetada.

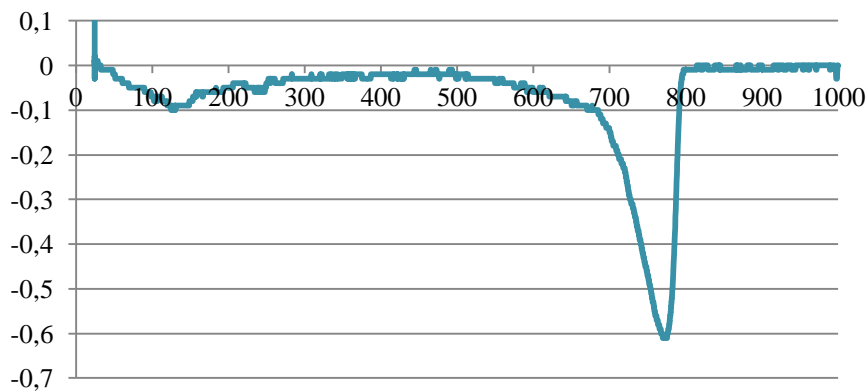


Figura 5.3 – Curva dTG da NHL_10T+10Mk aos 90 dias

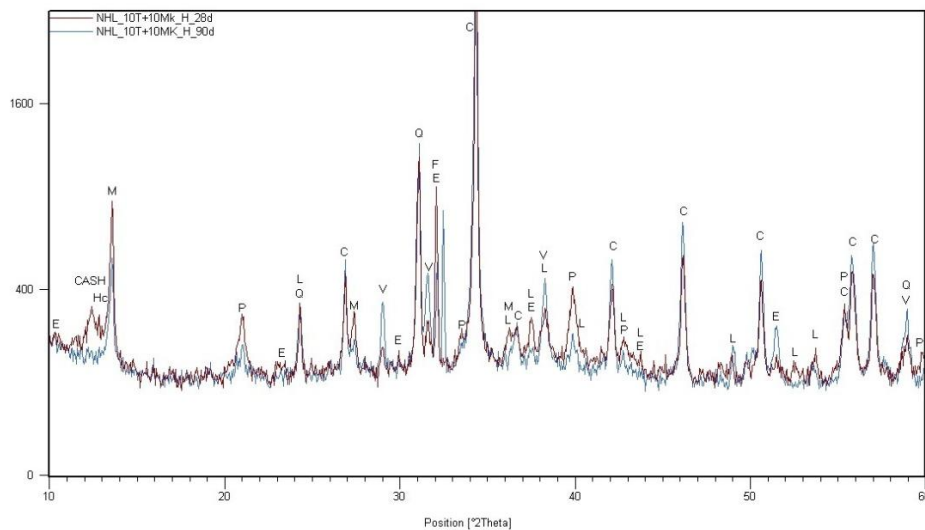


Figura 5.4 – Difratogramas da NHL_10T+10Mk aos 28 e 90 dias

5.3. Comparação com trabalhos semelhantes

Como a cal hidráulica natural utilizada neste trabalho de investigação é de formulação recente, na bibliografia não estão ainda disponíveis muitas publicações que sejam efetivamente comparáveis.

Grilo (2013) analisou argamassas de cal hidráulica natural NHL 3.5, do mesmo lote de produção que a cal utilizada no presente trabalho de investigação, com teores de 10 e 20% de Mk em substituição de massa equivalente de cal. As argamassas formuladas foram expostas a três condições de cura (húmida, standard e marítima) e estudadas a três idades (28, 90 e 180 dias).

No que respeita aos parâmetros mecânicos, as argamassas da cura H, à semelhança dos resultados obtidos neste trabalho, também apresentaram resultados superiores, comparativamente aos das restantes curas; as argamassas com Mk também apresentaram resistências bastante superiores à das argamassas de referência, pelo que Grilo concluiu que as reações de hidratação e pozolânica são preponderantes na cura H. A argamassa de referência na cura St também apresentou valores inferiores de resistências, o que se deve à preponderância de reações de carbonatação face à hidratação; no entanto, na composição com 10% de Mk verifica-se que a Rc apresenta um valor, quando sujeita a cura St, ligeiramente superior ao obtido na cura H, o que também foi verificado no presente trabalho.

No que respeita à análise da resistência aos sulfatos, as argamassas com Mk também apresentaram os piores resultados sendo que estes foram mais graves na argamassa com 10% de Mk e aos 28 dias, tal como foi constatado nos resultados obtidos neste trabalho. O único composto novo verificado foi thenardite, que atendendo à reduzida porosidade justifica a degradação da argamassa (neste trabalho também foram verificados poros de menores dimensões nas argamassas com Mk comparativamente às argamassas de referência). Por outro lado, no trabalho desenvolvido por Grilo (2013) foi feita análise DRX às amostras contaminadas aos 28 e aos 90 dias, detetando-se o aumento da etringite e de um sulfo-aluminato de cálcio hidratado na análise aos 28 dias, sobretudo na argamassa com 10% de Mk, que não foi detetado aos 90 dias. A existência de etringite, composto muito expansivo, aos 28 dias justifica o pior comportamento das argamassas nessa idade; já o facto de não ser detetada aos 90 dias justifica a melhoria do comportamento na idade mais avançada. Como foi referido anteriormente, no presente trabalho, não foi realizada análise DRX aos 28 dias, mas com esta verificação reafirma-se a hipótese de ter sido desenvolvida etringite no ensaio aos 28 dias e daí os piores resultados obtidos. Assim foi concluído que a degradação das argamassas deveu-se a uma ação mecânica, decorrente das tensões geradas nos poros pela cristalização dos sais, e à ação química, pela formação de etringite, cuja expansão também gerou tensões nos poros que conduziram à sua rotura.

No caso do comportamento face à água das argamassas de Grilo (2013) verifica-se que as argamassas com a introdução de Mk, e com o aumento do seu teor, apresentam valores de CC com tendência a ser menores, sendo portanto a absorção de água mais lenta. Também neste caso se verifica tendência dos resultados da cura H serem inferiores aos das restantes condições de cura, apesar da diferença não ser significativa. A introdução de Mk e o aumento do seu teor evidencia uma tendência de aumento do valor de TS, isto é, à medida que as argamassas têm mais Mk, a secagem inicial é mais rápida. Verifica-se ainda que o valor de TS entre curas não varia muito; no entanto, as composições com Mk apresentam um valor ligeiramente inferior na cura H, contrariamente ao que se verifica na argamassa de referência. Dos resultados obtidos verificou-se a tendência para as compo-

sições com apenas T e a com 5% de Mk apresentarem valores de TS superiores aos da argamassa de referência e das com 10% de Mk, que apresentam valores próximos.

Cruz (2012) caracterizou argamassas de NHL 3.5, produzida e classificada segundo a NP EN 459-1:2011 [IPQ, 2011], com substituições de 20 ou 40% de resíduo cerâmico (proveniente de tijolos, telhas e vasos e utilizado com parcela mista, fina e mais grossa) por massa equivalente de agregado. Ao nível de resistências à compressão verificou-se que as argamassas com resíduo apresentaram resistências à flexão e à compressão muito superiores à da argamassa de referência. Uma vez que no presente estudo o resíduo era distinto (de ladrilho de revestimento) e particularmente utilizado em substituição do ligante, não se verificou essa tendência nas argamassas formuladas e caracterizadas, apresentando em todas as curas a diminuição de Rc com a introdução de resíduo e com o aumento do seu teor (apesar de principalmente nas curas St e SP a variação não ser significativa).

No que respeita à absorção de água por capilaridade Matias (2013), que descreveu as características das argamassas produzidas na campanha experimental levada a cabo por Cruz (2012), evidenciou a discrepância de resultados de CC entre as argamassas formuladas com NHL 3.5 e os diversos tipos de resíduo cerâmico. No entanto, considerando apenas os resultados da argamassa de referência e das composições com resíduo proveniente do tijolo, a qualquer idade, é possível constatar uma ligeira diminuição do valor de CC quando se introduz 20% do resíduo, mais significativa com a evolução com a idade, e uma diminuição mais significativa de CC para um teor de resíduo de 40%. No caso do resíduo proveniente das telhas e dos vasos a tendência é contrária. Neste caso, apesar de com a introdução de resíduo, CC diminuir, comparativamente à argamassa de referência, com o aumento do seu teor, CC aumenta. No presente estudo, em relação às argamassas sujeitas a cura St, verificou-se uma tendência semelhante à verificada por Matias (2013) no caso dos resíduos provenientes de telhas e vasos. Nas restantes condições de cura, a introdução de resíduo conduz a um aumento de CC comparativamente à argamassa de referência, não sendo o aumento significativo com o aumento do seu teor.

5.4. Avaliação final das argamassas

As argamassas a adotar no caso de alvenarias antigas, seja para substituição ou reparação de argamassas de reboco ou para refechamento de juntas, devem ser compatíveis com o suporte e com as argamassas pré-existentes. Para garantir a compatibilidade em termos mecânicos ou de comportamento face à água foi definida uma gama indicativa de valores obtidos aos 90 dias de idade através da qual as argamassas podem ser classificadas [VEIGA *et al.*, 2010]. Os resultados de Rt, Rc e CC do presente trabalho foram comparados aos 90 dias de idade com os intervalos de valores definidos por Veiga (2010) no caso de rebocos e refechamento de juntas. Ed também foi analisado, mas na ausência de resultados aos 90 dias, foram comparados os resultados aos 28 dias.

Podem ser consultados na *Figura 5.5*. Nesta figura, as linhas horizontais a traço contínuo representam o intervalo de valores entre o qual são consideradas adequadas argamassas para rebocos. Na linha a tracejado está representado o intervalo de valores considerados adequados para argamassas para refechamento de juntas.

Em relação à adequabilidade das composições a adotar em rebocos:

- No caso de Ed, qualquer uma das composições quando expostas a cura St, ou a argamassa de referência e argamassas com apenas T quando sujeitas a cura SP, são consideradas adequadas; as argamassas NHL_10T_H e NHL_10T+10Mk_SP apresentam valores muito próximos do valor máximo do intervalo estipulado.
- Em relação a Rt, as argamassas com apenas T quando sujeitas a cura SP são as mais adequadas. As argamassas sujeitas a cura St e as NHL_5T+5Mk e NHL_10T+10Mk quando sujeitas a cura SP apresentam valores no limite máximo do intervalo.
- No caso de Rc as argamassas NHL_5T e NHL_10T em qualquer uma das curas é considerada adequada, apesar da NHL_5T_H apresentar um valor muito próximo do limite máximo referido por Veiga (2010). As argamassas NHL_5T+5Mk sujeitas a curas SP e St são adequadas. As argamassas com 10% de Mk sujeitas a curas SP e St apresentam valores muito próximos do limite máximo do intervalo; já as argamassas com Mk sujeitas a cura H apresentam valores de Rc bastante superiores aos requeridos.
- No caso do CC, e apesar das argamassas da cura H apresentarem valores consideravelmente inferiores aos das restantes curas em todas as composições, nenhuma argamassa satisfaz os critérios estabelecidos, apresentando em todos os casos CC superiores aos considerados adequados.

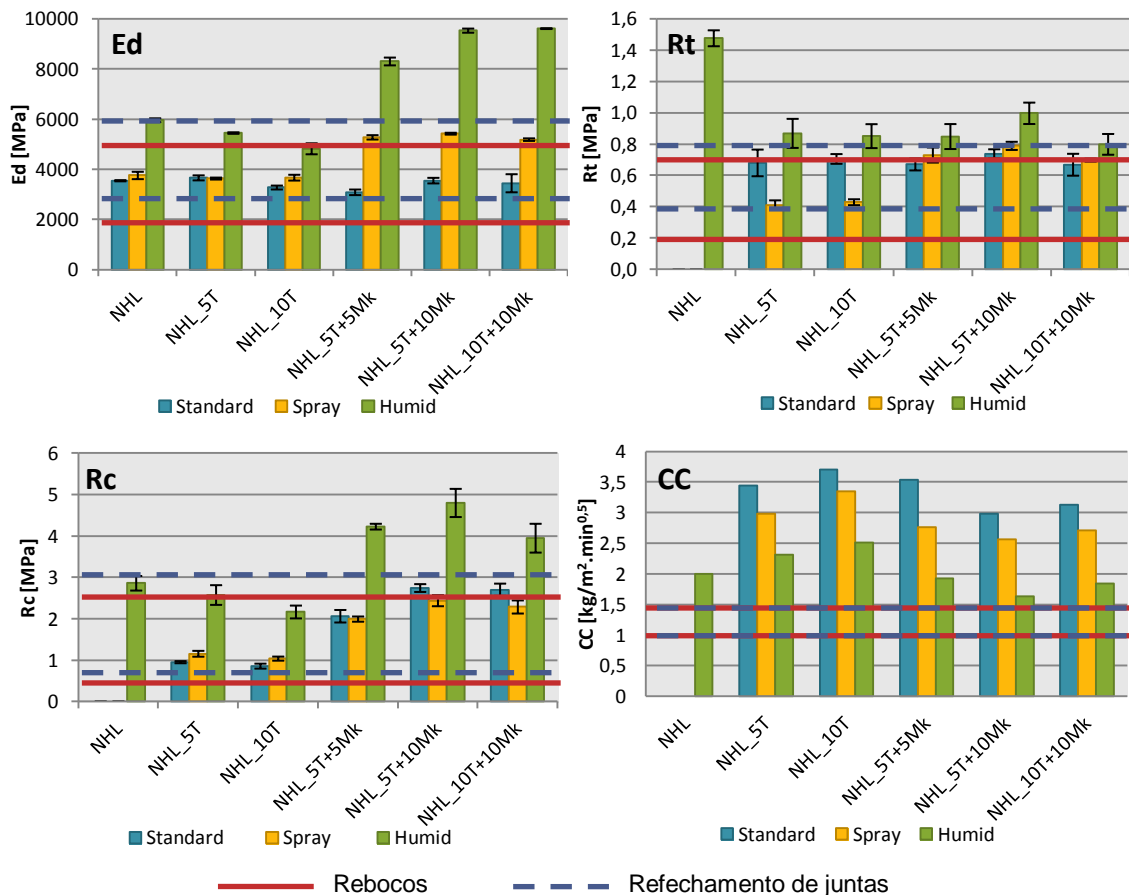


Figura 5.5 – Critérios de classificação de argamassas para rebocos e refecimento de juntas por Veiga (2010)

No caso da adequabilidade das composições ao uso em refechamento de juntas:

- Na análise de E_d e R_c , qualquer uma das argamassas, à exceção das com Mk quando expostas a cura H, é considerada adequada.
- Em relação a R_t , qualquer argamassa sujeita a cura St e SP é passível de uso em refechamento de juntas.
- No caso de CC, à semelhança do que ocorre em relação ao uso em rebocos, nenhuma argamassa apresenta valor inserido nos critérios definidos.

No entanto, considera-se que as argamassas em estudo não serão apenas aplicáveis em intervenções em edifícios muito antigos (do caso dos analisados por Veiga et al. (2010)). Embora se tenham utilizado agregados e procedimentos de ensaio nem sempre de acordo com as normas EN 1015 para ensaio de argamassas, procede-se a uma comparação com a norma de requisitos de argamassas de reboco. A norma NP EN 998-1:2010 [IPQ, 2010b] define valores para classificar argamassas endurecidas para reboco, uma vez que o desempenho da argamassa, e portanto, as propriedades requeridas, dependem da utilização e das condições de exposição da argamassa. Assim a norma apresenta valores de resistência à compressão aos 28 dias, de coeficiente de capilaridade e de condutibilidade térmica associados a cada uma das categorias de aplicação/exposição previstas. No Quadro 5.7 são apresentados os valores definidos pela norma.

Quadro 5.7 – Classificação das propriedades das argamassas de reboco endurecidas [IPQ, 2010b]

Propriedades	Categorias	Valores
Resistência à compressão aos 28 dias [MPa]	CS I	0,4 a 2,5
	CS II	1,5 a 5,0
	CS III	3,5 a 7,5
	CS IV	≥ 6
Coeficiente de capilaridade [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$]	W0	Não especificado
	W1	$\leq 0,4$
	W2	$\leq 0,2$
Condutibilidade térmica [W/m.K]	T1	$\leq 0,1$
	T2	$\leq 0,2$

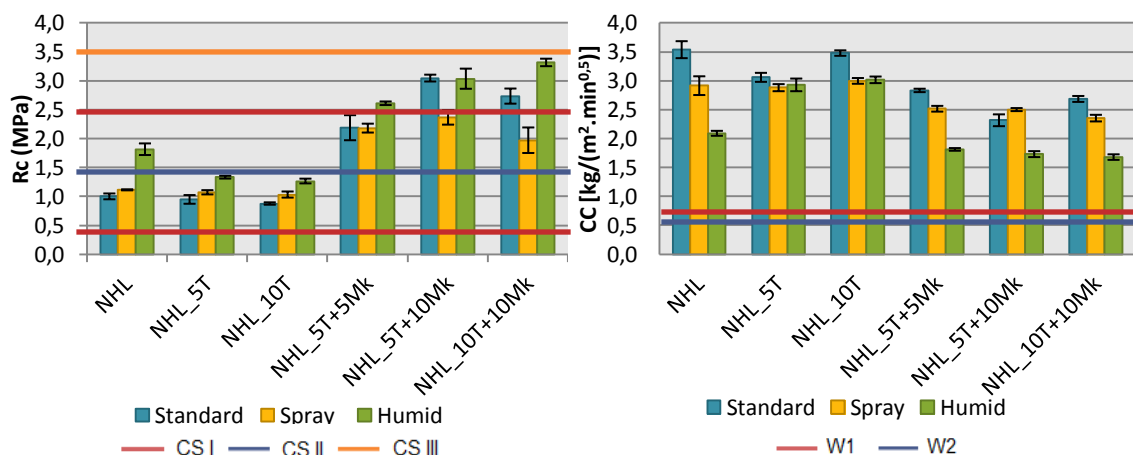


Figura 5.6 – Valores de R_c e CC para classificação de argamassas segundo NP EN 998-1:2010 [IPQ, 2010b]

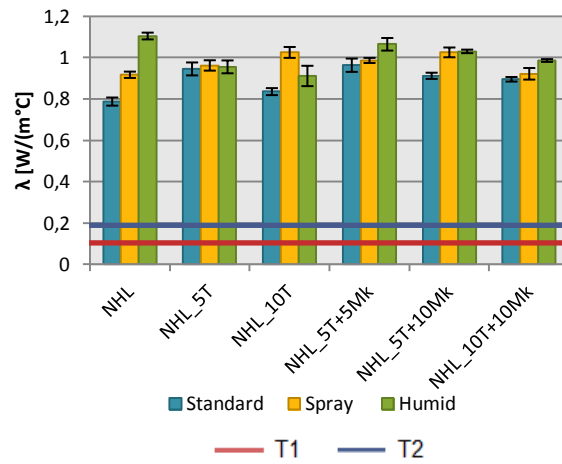


Figura 5.7 - Valores de λ para classificação de argamassas segundo NP EN 998-1:2010 [IPQ, 2010b]

Os valores especificados para a condutibilidade térmica (de argamassas térmicas) são bastante inferiores ao valor mínimo obtido, correspondente à argamassa de referência da cura St. Assim as argamassas não serão classificadas em relação a esta propriedade.

6. CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais e a síntese das principais tendências e comportamentos constatados na caracterização das argamassas. São ainda apresentadas sugestões para desenvolvimentos futuros do presente trabalho.

6.1. Considerações finais

Recordando os objetivos propostos para a realização do presente estudo, pretendia-se contribuir para um maior conhecimento das propriedades de argamassas realizadas com uma cal com propriedades hidráulicas de fabrico nacional recente, no caso uma NHL3.5. Para além disso pretendia-se também avaliar a influência de substituições parciais da cal por um resíduo cerâmico, isoladamente ou em conjunto com um metacaulino. Para essa fim caracterizaram-se argamassas de cal hidráulica natural com resíduo cerâmico e metacaulino, e analisaram-se com a finalidade de avaliar a sua adequação especialmente com vista à reabilitação de edifícios (mais antigos ou mais recentes). Uma argamassa com a referida função deve ser compatível com as alvenarias que, particularmente no caso de serem mais antigas, são menos resistentes, mais deformáveis e porosas do que as alvenarias construídas atualmente. A adoção do metacaulino tem na mistura a função de pozolana; quanto ao resíduo cerâmico, para além da função de filler, pretendia-se saber se introduzia também algum efeito pozolânico e que influencia introduzia nas argamassas.

A adoção de resíduo cerâmico em substituição de cal NHL3.5 dá um contributo sustentável para a argamassa, uma vez que com a sua utilização é economizado o teor de cal e logo os consequentes impactos inerentes à sua produção (consumo energético e extração de recursos naturais – pedra calcária). Além disso ainda é evitado o depósito de resíduos cerâmicos em vazadouro, sejam eles provenientes de desperdícios de obra ou resultantes de desperdícios de fábrica ou produtos cerâmicos não conformes que não chegam ao mercado.

Tendo em conta a influência das composições constatou-se que as argamassas com T e Mk apresentam resistências mecânicas consideravelmente superiores às das argamassas de referência e às com apenas T em substituição de cal, o que era expectável visto que o resíduo cerâmico apresenta uma reatividade pozolânica bastante inferior à do metacaulino. Essas argamassas ainda apresentam uma absorção capilar mais lenta do que as restantes composições, apesar da quantidade de água absorvida ser igual ou até superior à das restantes argamassas. A sua capacidade de secagem é mais lenta a nível inicial e ao longo do tempo e o seu comportamento face aos sulfatos é bastante pior do que as restantes composições.

As composições apenas com T em substituição de cal apresentam resistências inferiores às das respetivas argamassas de referência; no entanto a diferença não é significativa. A absorção de água por capilaridade é mais rápida nas referidas argamassas, mas em compensação o seu processo de secagem é mais rápido e a velocidade de absorção de água sob pressão (avaliada no ensaio

dos tubos de Karsten) é menor. O comportamento face aos sulfatos foi claramente mais positivo nas argamassas com T, comparativamente às argamassas com T e Mk, apresentando estas variações de massa da mesma ordem de grandeza que as argamassas de referência.

Na caracterização das argamassas constatou-se que, além da influência da composição da argamassa, também as diferentes curas influenciam bastante os resultados. Assim constatou-se que as argamassas sujeitas a cura H apresentam resistências mecânicas superiores e uma absorção capilar mais demorada. No entanto, o comportamento aos sais é mais negativo neste tipo de cura. Por outro lado, as argamassas expostas a cura SP, que na maioria dos parâmetros estudados apresentam um comportamento intermédio entre as curas St e H, no caso da resistência aos sulfatos apresentam melhor comportamento, evidenciando menores variações de massa e conseqüentemente menor degradação. Uma cura inicial parecida com esta pode ser conseguida em obra, com aspersão da superfície das argamassas durante os primeiros dias.

A caracterização do comportamento das argamassas com a evolução da idade também se revela importante, uma vez que em alguns parâmetros estudados notam-se diferenças significativas entre as idades. No que respeita à resistência à compressão, verifica-se que nas curas SP e St as variações dos resultados dos 28 para os 90 dias são muito ligeiras. Por outro lado, na cura H, verifica-se um aumento significativo da Rc. As variações em relação ao coeficiente de capilaridade e ao valor assintótico também não são significativas. Já no caso da TS verifica-se que, com a evolução da idade, os valores diminuem em quase todas as composições/curas, sendo o processo de secagem inicial mais lento a idades mais avançadas. No caso do ensaio de sulfatos as diferenças entre os resultados obtidos nas duas idades são muito grandes. Aos 90 dias a maioria das composições/curas apresentam menor variação de massa, não se verifica a degradação total de tantas composições como o verificado aos 28 dias, e os provetes só começam a apresentar vestígios de degradação a ciclos mais avançados do ensaio.

As composições NHL_5T e NHL_10T aparentam assim ser bastante adequadas à adoção em edifícios antigos segundo os parâmetros estipulados por Veiga (2010), uma vez que as resistências das argamassas com Mk são consideradas excessivas. Apresentam-se ainda mais eficientes para aplicação em suportes eventualmente contaminados por sulfatos face às com metacaulino, evidenciando bastante menos degradação.

Essas composições sujeitas a cura SP, mais facilmente reproduzível em obra, evidenciaram menor degradação no ensaio de sulfatos, sendo consideradas as mais resistentes ao seu efeito. Em termos de Rc não se notam diferenças de resultados para a argamassa de referência da mesma cura e no caso da absorção de água sob pressão também não. Portanto com estas composições, com teores de 90 a 95% de cal e restante de um resíduo sem grandes alternativas de valorização, consegue-se produzir argamassas com características bastante semelhantes à da argamassa com 100% de cal, o que é considerado bastante positivo. As argamassas NHL_5T_SP e NHL_10T_SP são consideradas as mais adequadas para substituição de rebocos antigos, sendo também bastante vantajosas pela contribuição para a sustentabilidade na construção.

No âmbito do desenvolvimento do presente trabalho foi publicada e apresentada publicamente em Coimbra, no Congresso Nacional “Construção 2012” em Dezembro de 2012, uma comunicação intitulada “Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino e resíduo cerâmico” [FONTES et al., 2012].

6.2. Desenvolvimentos futuros

Para trabalhos futuros sugere-se a caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 com substituição de massa de cal por resíduo cerâmico e metacaulino mas com traços mais fracos, principalmente quando expostas a cura H. Poderá ainda ser interessante estudar as mesmas argamassas formuladas no presente trabalho a idades mais avançadas.

Dados os resultados positivos obtidos na caracterização de argamassas sujeitas a cura SP, poderá ter interesse a sua caracterização em muretes expostos a condições exteriores e a execução de ensaios de resistência aos sulfatos por ascensão por capilaridade.

Sugere-se a análise das argamassas por microscopia eletrónica de varrimento (MEV), de forma a caracterizar os compostos hidratados (amorfos e cristalinos). Por outro lado, durante e após ensaio de resistência aos sulfatos considera-se útil a análise por DRX das eflorescências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARIZZI, A.; CULTRONE, G. (2012). *Aerial lime-based mortars with a pozzolanic additive and different admixtures: A mineralogical, textural and physical-mechanical study*. Construction and Building Materials, vol. 31, pp. 136-143.

BARONIO, G.; BINDA, L. (1997). *Study of the pozzolanicity of some bricks and clays*. Construction and Building Materials, vol. 11(1), pp. 41-46.

BINICI, H. (2007). *Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties*. Construction and Building Materials, vol. 21, pp. 1191-1197.

BINICI, H.; KAPUR, S.; AROCENA, J.; KAPLAN, H. (2012). *The sulphate resistance of cements containing red brick dust and ground basaltic pumice with sub-microscopic evidence of intra-pore gypsum and ettringite as strengtheners*. Cement & Concrete Composites, vol. 34, pp. 279-287.

BÖKE, H.; AKKURT, S.; İPEKOĞLU, B.; UĞURLU, E. (2006). *Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters*. Cement and Concrete Research, vol.36. pp. 1115-1122.

CARNEIRO, J. (2012). *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino*. Dissertação de Mestrado. FCT-UNL. Lisboa

CEN (1998). *EN 1015-2 – Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. Brussels, European Committee for Standardization.

CEN (1999a). *EN 1015-11 – Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardener mortar*. Brussels, European Committee for Standardization.

CEN (1999b). *EN 1015-3 – Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*., Brussels, European Committee for Standardization.

CEN (2001). *EN 459-1 – Building lime. Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria*. Brussels, European Committee for Standardization.

CEN (2002). *EN 1015-18 – Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardener mortar*. Brussels, European Committee for Standardization.

CEN (2009). *EN 15801 – Conservation of cultural property - Test methods - Determination of absorption by capillarity*. Brussels, European Committee for Standardization.

CEN (2010). *EN 459-1 – Building lime. Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria*. Brussels, European Committee for Standardization.

CRN – ICR (1988). Normal 29/88 – *Caratterizzazione del materiale lapideo, valutazione della olegradazione e degli effetti dei trattamenti conservativi*. Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto Centrale per il Restauro.

CRUZ, A. (2012). *Argamassas de cal hidráulica natural com incorporação de resíduos cerâmicos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra.

DIAS, I. (2013). *Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra - A influência da terra como agregado parcial*. Dissertação de Mestrado. FCT-UNL. Lisboa.

FARIA-RODRIGUES, P. (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Dissertação de Doutoramento. FCT-UNL. Lisboa.

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

FARIA-RODRIGUES, P. (2009). *Resistance to salts of lime and pozzolan mortars*. RILEM Proceedings PRO 067. International RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry. [<http://www.rilem.net/images/publis/pro067-010.pdf>]

FARIA, P. (2011). *PROJETO FCT METACAL - Procedimentos de ensaio de argamassas*. Departamento de Engenharia Civil, FCT-UNL.

FARIA, P.; SILVA, V.; FLORES-COLEN, I. (2012a). *Argamassas de cal hidráulica e pozolanas artificiais: avaliação laboratorial*. Comunicação do “4º Congresso Português de Argamassas de Construção”. APFAC. Coimbra.

[http://www.apfac.pt/congresso2012/comunicacoes/Paper%2010_2012.pdf]

FARIA, P. (2012b). *Argamassas Sustentáveis*. Comunicação da “2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono”. FCT-UNL. Lisboa. [http://run.unl.pt/bitstream/10362/9494/1/Faria_2012.pdf]

FARIA, P.; SILVA, V.; GRILO, J.; CARNEIRO, J.; BRANCO, T.; MERGULHÃO, D.; ANTUNES, R. (2012c). *Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural*. Livro da Conferência CIRea 2012. UNL. Lisboa.

FONTES, T.; FARIA, P.; SILVA, V. (2012). *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino e resíduo cerâmico*. Comunicação do Congresso Nacional “Construção 2012”. UC. Coimbra.

GAMEIRO, A.; SANTOS SILVA, A.; VEIGA, R.; VELOSA, A. (2012). *Hydration products of lime-metakaolin pastes at ambient temperature with ageing*. Thermochemica Acta, vol. 535, pp.36-41.

GONÇALVES, T.; RODRIGUES, J. (2010). *Argamassas de revestimento para paredes afectadas por cristalização de sais solúveis: influência do substrato*. Comunicação do “3º Congresso Português de Argamassas de Construção”. APFAC. Lisboa.

[http://www.apfac.pt/congresso2010/comunicacoes/Paper%2018_2010.pdf]

- GRILO, J. (2013). *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional*. Dissertação de Mestrado. FCT-UNL. Lisboa.
- GROOT, C. (2012). *TC 203-RHM: Repair mortars for historic masonry – Performance requirements for renders and plasters*. *Materials & Structures* 45, pp. 1277-1285.
- HENRIQUES, F. (2005). Challenges and perspectives of replacement mortars in architectural conservation. *Proceedings – International RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry*. [<http://www.rilem.net/images/publis/pro067-014.pdf>]
- HENRIQUES, F.; FARIA, P. (2008). *O papel da investigação no estudo das argamassas de substituição na conservação do património*. *Revista Engenharia Civil*, número 31, pp 29-37, Universidade do Minho. [<http://www.civil.uminho.pt/revista/n31/Pag%2029.pdf>]
- HENRIQUES, F. (2009). *Documentos de Materiais da Construção I*. Departamento de Engenharia Civil. FCT-UNL.
- IPQ (2000). *NP EN 933-1 – Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração*. Lisboa, Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (2001). *NP EN 12370 – Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência á cristalização de sais*. Lisboa, Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (2002). *NP EN 1097-3 – Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios*. Lisboa, Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (2002). *NP EN 459-1 – Cal de construção. Parte 1: definições, especificações e critérios de conformidade*. Lisboa, Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (2006). *NP EN 14146 – Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)*. Lisboa, Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (2008). *NP EN 1936 – Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. Lisboa, Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (2010a). *NP EN 4220 – Pozolanas para betão, argamassa e caldas. Definições, requisitos e verificação da conformidade*. Lisboa, Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (2010b). *NP EN 998-1 – Especificações de argamassas para alvenarias - Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores*. Lisboa, Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (2011). *NP EN 459-1 – Cal de construção. Parte 1: definições, especificações e critérios de conformidade*. Lisboa, Instituto Português da Qualidade.
- JAMÚ, N. (2013). *Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra - A influência da terra como ligante*. Dissertação de Mestrado. FCT-UNL. Lisboa.
- KAVAS, T.; OLGUN, A. (2008). *Properties of cement and mortar incorporating marble dust and crushed brick*. *Ceramics – Silikáty*, vol. 52 (1) pp. 24-28.

- LANAS, J.; BERNAL, J.; BELLO, M.; GALINDO, J. (2004). *Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars*. Cement and Concrete Research, vol.34. pp. 2191-2201.
- MARGALHA, G. (2007). *Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea*. Comunicação do “2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção”. APFAC. Lisboa. [http://conservarcal.lnec.pt/pdfs/GORETI_Areia_APFAC.pdf]
- MATIAS, G.; TORRES, I. & FARIA, P. (2010). *Argamassas de substituição com resíduos de tijolo cerâmico*. Comunicação do “3º Congresso Português de Argamassas de Construção”. APFAC. Lisboa. [http://www.apfac.pt/congresso2010/comunicacoes/Paper%2085_2010.pdf]
- MATIAS, G.; FARIA, P.; TORRES, I. (2013). Viability of ceramic residues in lime-based mortars. Comunicação a apresentar: 3rd Historic Mortars Conference, September 2013, Glasgow, Scotland.
- MELO, K.; CARNEIRO, A. (2010). *Effect of Metakaolin’s finesses and content in self-consolidating concrete*. Construction and Building Materials, vol. 24, pp. 1529-1535.
- MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; AGGELAKOPOULOU, E. (2004). *Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis*. *Thermochimica Acta*, vol. 420, pp.135-140.
- PATRICÍO, C. (2013). *Caracterização de caldas de cal hidráulica natural e metacaulino para consolidação de alvenarias antigas*. Dissertação de Mestrado. FCT-UNL. Lisboa
- PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L.; CASTRO-GOMES, J.; SANTOS, P. (2012). *The potencial pozzolanic activity of glass and red-clay waste as cement mortars components*. Construction and Building Materials, vol. 31, pp. 197-203.
- RATO, V. (2006). *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Dissertação de Doutoramento. FCT-UNL. Lisboa.
- RILEM (1980). TC 25-PEM – *Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods*. Test nº II.5 – Evaporation curve. Materials & Structures, vol.13, pp. 204-207
- SANTOS SILVA, A.; RICARDO J.M.; SALTA, M.; ADRIANO, P.; MIRÃO, J.; CANDEIAS, A. E.; MACIAS, S. (2004). *Characterization of Roman mortars from the historical town of Mértola*. Heritage Weathering and Conservation, pp.85-90.
- SANTOS SILVA, A.; PAIVA, M.; RICARDO, J.; SALTA, M. M.; MONTEIRO, A. M.; ESTEVÃO, A. C. (2006). *Characterisation of roman mortars from the archaeological site of Troia (Portugal)*. Materials Science Fórum, vol. 514, pp. 1643-1647.
- SANTOS SILVA, A. (2009). *Durabilidade do betão. Mitigação das reacções expansivas internas*. Construção Magazine, vol. 31, pp. 16-20.
- SANTOS, A. VEIGA, R. (2012). *Argamassas compatíveis para edifícios antigos*. Jornadas LNEC – 2ª Jornadas de Investigação e Inovação – Cidades e desenvolvimento. Lisboa. [http://jornadas2012.lnec.pt/site_2_Cidades_e_Developimento/COMUNICACOES/T1_SANTOS_c022.pdf]

- SEPULCRE-AGUILAR, A.; HERNÁNDEZ-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, vol. 40, pp. 66-76.
- SEQUEIRA, A.; FRADE, D.; GONÇALVES, P. (2007). *Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação*. Comunicação do “2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção”. APFAC. Lisboa. [http://www.apfac.pt/congresso2007/comunicacoes/Paper%2061_07.pdf]
- TEUTONICO, J. M.; MCCAIG, I.; BURNS, C. ASHURST (1994). *The Smeaton project: factors affecting the properties of lime-based mortars*. APT bulletin. ICCROM. Vol.25 (3-4), pp.32-49.
- TORRACA, G. (2009). *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation*. Los Angeles, The Getty Conservation Institute.
- VEIGA, R.; TAVARES, M. (2002). *Características das paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura*. Actas do Encontro “A indústria das tintas no início do século XXI”. Lisboa. [http://conservarcal.lnec.pt/pdfs/RVMT_APTETI.pdf]
- VEIGA, R.; VELOSA, A.; MAGALHÃES, A. (2009). Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation. *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 318-327.
- VEIGA, R.; FRAGATA, A.; VELOSA, A.; MAGALHÃES, A.; MARGALHA, G. (2010). *Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings*. *Architectural Heritage*, vol.4(2), pp.177-195.
- VELOSA, A.; COROADO, J.; VEIGA, R.; ROCHA, F. (2007). *Characterisation of roman mortars from Conímbriga with respect to their repair*. *Materials Characterization*, vol. 58, pp. 1208-1216.
- VELOSA, A.; SIDDIQUE, R.; CACHIM, P.; SANTOS SILVA, A.; CAMÕES, A.; COSTA, V.; RIBEIRO, T.; RAMÍREZ, S.; BLANCO-VARELA, M.; REVILLA, C.; VEIGA, R. (2013). *Metacaulino em Portugal: Produção, Aplicação e Sustentabilidade*. Livro do Projeto METACAL.
- VEJMELKOVÁ, E.; KEPPERT, M.; KERŠNER, Z.; ROVNANÍKOVÁ, P. & ČERNÝ, R. (2012). *Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal and durability properties of lime-metakaolin plasters for renovation of historical buildings*. *Construction and Building Materials*, vol. 31, pp. 22-28.

ANEXOS

Anexo I – Ficha técnica da cal NHL 3.5 da Secil



1. DESCRIPTION

Secil NATURAL LIME NHL 3,5 is a hydraulic binder composed in its majority by calcium silicates and aluminates, and calcium hydroxide. It is obtained by the burning of marlstone, followed by grinding.

Secil NATURAL LIME NHL 3,5 is classified as NHL 3,5 according to the NP EN 459-1.

Secil NATURAL LIME NHL 3,5 is a unique binder. In addition to featuring hydraulic properties, it also suffers a setting process by carbonation.

2. FIELD OF APPLICATION

In the production of mortars, as only binder or mixed with other hydraulic or serial binders, giving them workability and flexibility, significantly reducing retraction in hydraulic mortars (for ex. masonry, rendering and finishing mortars).

In the production of rehabilitation mortars, as only binder, for the execution of internal and external renders, over ancient substrates.

3. PRODUCT CHARACTERISTICS

Physical Characteristics	Value	Standard	
Color	Beige	-	
Specific Mass (kg/dm ³)	0,65 ± 0,05	EN 459-1	
Density (g/cm ³)	2,7	-	
Fineness (%)	90 µm ≤ 15,0 200 µm ≤ 2,0	EN 459-1	
Blaine (cm ² /g)	9000	-	
Expandability - alternative method (mm)	≤ 20	EN 459-1	
Free Water (%)	≤ 2,0	EN 459-1	
Air content (%)	≤ 5	EN 459-1	
Penetration (mm)	<10 e >50	EN 459-1	
Setting time (h)	initial final	> 1,0 ≤ 30,0	EN 459-1

Mechanical Characteristics	Value	Standard
Mechanical compressive strength 28 dias (MPa)	≥ 3,5 e ≤ 10	EN 459-1

Chemical Characteristics	Value	Standard
Sulphates (SO ₄) (%)	≤ 2,0	EN 459-1
Free Lime Ca(OH) ₂ (%)	≥ 25,0	EN 459-1

4. PRODUCTION OF MORTARS

The dosage of Secil NATURAL LIME NHL 3.5 in a mortar must be adequate for the intended final use. In rendering and layering mortars Secil NATURAL LIME NHL 3.5, has an important role as only binder or mixed with others.

Previously mix Secil NATURAL LIME NHL 5 with the aggregate and afterwards add water in the necessary amount in order to obtain a good workability. As an orientative value, please use a water/binder ratio of 0,6 expressed by volume.

Secil Argamassas

Secil Maringança, S.A.
Customer Support: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal
Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilmaringanca.pt



www.secilmaringanca.pt

Anexo II – Ficha técnica do metacaulino M-1200S da Imerys

ARGICAL-M 1200S



PRODUCT SPECIFICATION

Caractéristiques produit

ARGICAL-M 1200S is an artificial pozzolana (metakaolin). It is obtained by micronising and calcining a kaolinitic clay from the Charentes basin.

ARGICAL-M 1200S is a dehydroxylated aluminium silicate. Its general formula is $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. It is an amorphous non-crystallised material, constituted of lamellar particles
 ARGICAL-M 1200S est une pouzzolane artificielle (métakaolin), obtenue par broyage et calcination d'une argile kaolinique du bassin des Charentes.

ARGICAL-M 1200S est un silicate d'alumine déshydroxylé, de composition générale $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. C'est un matériaux amorphe, non cristallisé, dont les particules présentent une forme lamellaire

The technical details contained in this data sheet are given in all good faith for indicative purpose only, and do not constitute a guarantee by AGS Minéraux.

Sales are in accordance with our "Conditions of Sale", copies of which will be supplied on request.

Les informations contenues dans ce document sont données à titre purement indicatif. Les valeurs indiquées n'impliquent pas obligation pour le fournisseur. Elles ne constituent en aucun cas une garantie sur le produit et sur ses spécifications.

Seule la fiche de Spécification Contractuelle dans le cadre de nos Conditions Générales de Ventes engage notre société auprès des clients.

PRODUCT USE

Additive for concretes, mortars and coatings, made from Portland cement or lime

Domaine d'utilisation

Additif pour bétons, mortiers, revêtements à base de ciment Portland ou de chaux

CHEMICAL ANALYSIS

Analyse chimique

SiO ₂	55 %
Al ₂ O ₃	39 %
K ₂ O + Na ₂ O	1,0 %
Fe ₂ O ₃	1,8 %
TiO ₂	1,5 %
CaO + MgO	0,6 %

LOSS ON IGNITION

Perte au feu

1 %

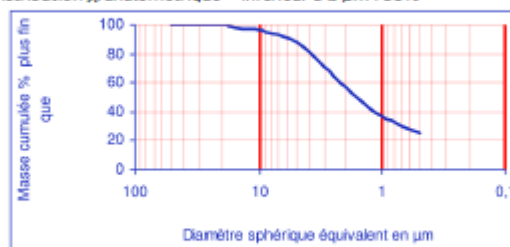
TYPICAL PHYSICAL CHARACTERISTICS

Caractéristiques physiques moyennes

pH	6
Pozzolanic index (Chapelle test) / Indice pouzzolanique	1400 mg Ca(OH) ₂ /g
Brightness photovolt blue filter / Blancheur photovolt filtre bleu	74 %
Specific area (BET) / Surface spécifique (BET)	19 m ² /g
Water demand (Marsh cone) / Demande en eau (Cône de Marsh)	1650 g/kg
Specific gravity / Masse spécifique	2,2 g/cm ³
Bulk density / Densité apparente	250 kg/m ³
Loose / Non tassé	
Tamped / Tassé	400 kg/m ³

SIEVE ANALYSIS

Distribution granulométrique – Inférieur à 2 µm : 55%



rec
 05 46 04 17 11
 Fax : +33 (0)5 46 04 21 05
 www.ags-mineraux.com
 commercial@ags-mineraux.com

Revision 4 – 2008/07/24

