



João Pedro Baião Grilo

Licenciado em Ciências da Engenharia

**CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSAS DE CAL HIDRÁULICA
NATURAL NHL3.5 DE FABRICO NACIONAL**

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

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

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

Júri:

Presidente: Professora Doutora Zuzana Dimitrovová
Arguente: Doutora Maria do Rosário Veiga
Vogal: Professora Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues
Vogal: Doutor António Santos Silva



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Janeiro de 2013

“Copyright” João Pedro Baião Grilo, FCT/UNL e UNL

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

*Dá sopro, a aragem - ou desgraça ou ânsia -
Com que a chama do esforço se remoça,
E outra vez conquistemos a Distância -
Do mar ou outra, mas que seja nossa!*

Fernando Pessoa

À minha avó Leonor

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar esta dissertação, expresso todo o meu agradecimento aos que contribuíram para a sua realização:

Em especial à Professora Doutora Paulina Faria orientadora deste trabalho, pela disponibilidade desde o primeiro momento para a orientação deste trabalho, por todo o apoio prestado, conhecimentos e sugestões partilhadas, todos os ensinamentos dados e o interesse transmitido ao longo da elaboração da dissertação.

Ao Doutor António Santos Silva, co-orientador deste trabalho, por todo o apoio prestado na realização dos ensaios realizados no Departamento de Materiais do LNEC, pelos conhecimentos partilhados, sugestões prestadas na escrita desta dissertação e por toda a simpatia que demonstrou.

Ao Eng.º Vítor Silva pela ajuda em toda a campanha experimental desta dissertação, pelas sugestões construtivas, discussões de pontos de vista que muito contribuíram para o bom desenvolvimento desta dissertação e claro por toda a simpatia e amizade demonstradas.

Ao Eng.º André Gameiro, pelo apoio prestado na realização dos ensaios realizados no Departamento de Materiais do LNEC, e por todas as sugestões dadas para a escrita deste trabalho.

À SECIL pela disponibilização da cal NHL 3.5 e a IMERYS pela disponibilização do metacaulino.

Aos meus colegas André Bandeira, Duarte Mergulhão, João Carneiro, Rui Antunes, Tiago Branco e Teresa Fontes pela ajuda concedida ao longo da campanha experimental.

Terminando com esta dissertação um longo e difícil período da minha vida tenho que expressar também o meu agradecimento a todos aqueles que muito ajudaram e foram essenciais neste percurso:

Aos meus colegas António Ganhão, Patrícia Pimenta, Pedro Ribeiro, Pedro “Rafael” Antunes, Telma Brás, Susana Mateus e João Gonçalves por todos e mais alguns momentos passados juntos ao longo desta caminhada.

Ao meu mano Fernando Simões, por todos os momentos apoio e por todas as conversas, trocas de ideias ao longo do meu curso e pela grande amizade.

À Inês Peres Rosa, companheira de todas as horas, pelo seu apoio inextinguível, pela sua amizade e toda a força transmitida em todos os momentos.

À minha família em especial aos meus pilares, o meu pai Eduardo Grilo e a minha avó Leonor Alexandre, por me terem dado a oportunidade de desenvolver todo este percurso académico e me apoiarem sempre em todos os momentos da minha vida.

RESUMO

Este estudo surge numa fase em que o setor da construção civil atravessa grandes dificuldades, e o parque imobiliário necessita de intervenções vastas ao nível da sua, reabilitação e/ou conservação; existe uma preocupação crescente com a sustentabilidade, nomeadamente da construção e dos materiais e produtos utilizados; existe também uma consciencialização para o facto do cimento Portland corrente não ser o ligante indicado para muitas aplicações. Face a estas condicionantes tecno-económico-ambientais tem-se assistido ao regresso às obras das cais de construção.

O presente estudo enquadra-se nos projetos *FCTMETACAL* e *LIMECONTECH*.

A entrada em vigor da norma NP EN 459-1:2011 obrigou à necessidade de alguma reformulação de cais hidráulicas naturais, e ao aparecimento no mercado nacional de novas cais. Neste trabalho estudam-se as argamassas com base em cal hidráulica natural NHL3.5, de produção nacional e classificada segundo a nova versão da norma. É uma cal com propriedades hidráulicas e com elevado teor em hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , cujo potencial de aplicação em construção nova ou na reabilitação de edifícios interessa avaliar. Produziram-se e caracterizaram-se, aos 28, 90 e 180 dias e após exposição em três distintas condições de cura, três tipos de argamassas ao traço volumétrico 1:3, diferindo entre si nas percentagens de substituição mássica de cal por metacaulino.

A introdução de metacaulino apresentou melhorias nas resistências mecânicas das argamassas com destaque para o teor de 10% de substituição, com melhorias evidentes no comportamento das argamassas em termos de absorção de água e secagem. A percentagem de 20 % revelou-se excessiva face aos resultados.

Com base na caracterização efetuada, a argamassa só de NHL3.5 indicia poder ser utilizada na conservação das fachadas de edifícios antigos e todas as argamassas realizadas indiciam ser adequadas para aplicação na reabilitação de edifícios com suportes mais resistentes e mesmo em construção nova.

Termos chave: Cal Hidráulica Natural; Metacaulino; Argamassa; Condição de Cura; Reabilitação; Construção;

ABSTRACT

This study comes up at a time when: the construction industry goes through serious difficulties; the built stock requires extensive interventions in terms of their rehabilitation and maintenance; there is a growing concern for sustainability in construction industry; there is also an awareness for the fact that Portland cement is not suitable for many of the applications that it is currently used for. All of these constraints contribute to the return of lime to building works.

This study fits into the *FCTMETACAL* and in the *LIMECONTECH* projects.

With the coming into effect of the NP EN 469-1:2011 standard, there was a need for a reclassification and sometimes reformulation of the building limes, and a new lime NHL3.5 appeared in the Portuguese market. In this thesis a study of mortars based on national natural hydraulic lime NHL3.5 is addressed. It is a lime with hydraulic properties and a high content of calcium hydroxide, Ca(OH)_2 , whose potential for application in new construction or building rehabilitation is interesting to assess. In this study mortars based on that lime at 28, 90 and 180 days of age were characterized. For that purpose three types of mortars with 1:3 (binder:aggregate) volumetric trace were produced, only differing on the substitution percentages of lime by metakaolin, and exposed to three different curing conditions.

The introduction of metakaolin showed improvements in the mechanical resistances of the mortars, especially for the ones with 10% substitution, and clear improvements in terms of lower water absorption and easier drying. Given the results, the percentage of 20% substitution proved to be excessive.

Based on this characterization, the mortars composed only by NHL3.5 can be used in the conservation of ancient buildings facades and all mortars should be suitable for application in the rehabilitation of buildings with tougher supports and even in new construction.

Key words: Natural hydraulic lime; Metakaolin; Mortar; Curing condition; Rehabilitation; Construction;

Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional

ÍNDICE GERAL

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÍNDICE DE TEXTO.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE QUADROS.....	xv
SIMBOLOGIA DE MATERIAIS, CURAS, ENSAIOS E PARÂMETROS.....	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 ESTADO DOS CONHECIMENTOS.....	5
3 PROCEDIMENTOS ADOTADOS NA CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	17
4 EXPOSIÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	45
5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	93
6 CONCLUSÕES.....	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
ANEXOS.....	127

ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação e enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura e organização do texto	3
2	Estado dos conhecimentos	5
2.1	Matérias-primas das argamassas com base em cal hidráulica	5
2.1.1	A cal hidráulica.....	5
2.1.2	Componentes pozolânicos	8
2.1.3	Agregados - areias	10
2.2	Argamassas	11
2.2.1	Considerações de base	11
2.2.2	Reabilitação e conservação de rebocos de alvenarias de edifícios	12
2.2.3	Argamassas à base de cal hidráulica	13
2.2.4	Argamassas à base de cal hidráulica e metacaulino.....	14
3	Procedimentos Adotados na Campanha Experimental.....	17
3.1	Introdução à campanha experimental desenvolvida	17
3.2	Matérias-primas.....	17
3.2.1	Cal hidráulica natural.....	17
3.2.2	Metacaulino	17
3.2.3	Agregado	18
3.3	Caraterização das matérias-primas	18
3.3.1	Análise granulométrica das areias	18
3.3.2	Baridade	20
3.4	Produção das argamassas.....	21
3.4.1	Amassaduras.....	22
3.4.2	Caracterização da argamassa no estado fresco: consistência por espalhamento.....	23
3.5	Execução dos provetes.....	23
3.6	Condições de cura.....	24
3.6.1	Cura marítima (Cura M).....	25
3.6.2	Cura húmida (Cura H).....	25
3.6.3	Cura standard (Cura S).....	26
3.7	Ensaio de caraterização das argamassas endurecidas.....	26
3.7.1	Organização dos ensaios	26
3.7.2	Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico	27

3.7.3	Ensaio de resistência à tração por flexão e compressão	28
3.7.4	Ensaio de absorção de água por capilaridade	30
3.7.5	Ensaio de secagem	32
3.7.6	Ensaio de condutibilidade térmica	34
3.7.7	Ensaio de porosidade aberta	35
3.7.8	Ensaio de resistência aos sulfatos	37
3.7.9	Ensaio de porosimetria de mercúrio.....	37
3.7.10	Ensaio de difração de raios X e de análise termogravimétrica.....	40
4	Exposição e análise de Resultados	45
4.1	Resultados da caracterização das argamassas no estado fresco	45
4.1.1	Consistência por espalhamento.....	45
4.2	Resultados da caracterização das argamassas endurecidas	45
4.2.1	Módulo de elasticidade dinâmico	46
4.2.2	Resistências à tração por flexão.....	48
4.2.3	Resistência à compressão	51
4.2.4	Absorção de água por capilaridade	54
4.2.5	Secagem	59
4.2.6	Condutibilidade térmica	63
4.2.7	Resistência aos sulfatos.....	64
4.2.8	Porosidade e massa volúmica aparente, método hidrostático.....	68
4.2.9	Porosimetria por intrusão de mercúrio	71
4.2.10	Caraterização química, mineralógica e microestrutural	76
5	Discussão de resultados	93
5.1	Parâmetros mecânicos	93
5.2	Porosidade aberta e massa volúmica aparente	98
5.3	Resistência aos sulfatos	100
5.4	Comportamento com a ação da água	102
5.5	Classificação das argamassas para o uso em edifícios antigos.....	106
5.6	Argamassas para rebocos de alvenarias	107
5.7	Outros trabalhos	109
6	Conclusões.....	115
6.1	Conclusões gerais	115
6.2	Desenvolvimentos Futuros.....	119
	Referências Bibliográficas	121
	Anexos	127
	Anexo I – Ficha técnica da cal NHL3.5	129

Anexo II – Ficha técnica do metacaulino	133
Anexo III – Dados climáticos do ambiente de cura marítima	134
Anexo IV – Dados climáticos da câmara de cura húmida.....	137
Anexo V – Resultados individuais de ensaios realizados.....	139
Anexo VI – Trabalhos expostos.....	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Cais de construção.....	6
Figura 3.1 – Materiais usados para a preparação das argamassas	18
Figura 3.2 – Curvas granulométricas de cada areia e da mistura de areias	19
Figura 3.3 – Sequência de produção das argamassas.....	22
Figura 3.4 – Ensaio de consistência por espalhamento.....	23
Figura 3.5 – Moldagem, compactação e nivelamento dos provetes e cura inicial dentro de saco de polietileno.....	24
Figura 3.6 – Estação experimental do LNEC e provetes em exposição junto ao mar	25
Figura 3.7 – Câmara de cura húmida	26
Figura 3.8 – Câmara de cura standard.....	26
Figura 3.9 – Equipamento “ZEUS Resonance Meter”	28
Figura 3.10 – Provete ensaiado à tração por flexão e rotura de tração por flexão	29
Figura 3.11 – Provete ensaiado à compressão e rotura de compressão.....	30
Figura 3.12 – Provete envolto na película, provetes com gaze e sem gaze e pesagem dos provetes	31
Figura 3.13 – Curva de absorção de água, cálculo do valor assintótico e coeficiente de capilaridade ..	32
Figura 3.14 – Ensaio de secagem	32
Figura 3.15 – Curva de secagem com o teor em água em função do tempo	33
Figura 3.16 – Curva de secagem com o teor em água em função da raiz tempo.....	34
Figura 3.17 – Realização do ensaio de determinação aproximada da condutibilidade térmica.....	35
Figura 3.18 – Ensaio de porosidade aberta, método hidrostático	35
Figura 3.19 – Pesagem hidrostática e pesagem saturada.....	36
Figura 3.20 – Ciclos do ensaio de resistência aos sulfatos	37
Figura 3.21 – Porosímetro “Autopore IV 955”	38
Figura 3.22 – Porosimetria por intrusão de mercúrio, MIP.....	39
Figura 3.23 – Difração de raios-X por uma amostra cristalina.....	41
Figura 3.24 – Preparação da amostra para análise XRD.....	41
Figura 3.25 – Difratómetro de raio-X “Philips PW3710” e difratograma.....	41
Figura 3.26 – Preparação da amostra para o difratómetro.....	42
Figura 3.27 – Preparação da amostra para análise de termogravimetria	43
Figura 3.28 – Analisador “SETARAM TG A92” e curva dTG.....	43
Figura 4.1 – Módulo de elasticidade dinâmico de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias.....	47
Figura 4.2 – Módulo de elasticidade dinâmico e variação face à argamassa de referência em cada cura	48
Figura 4.3 – Resistência à tração de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias	49
Figura 4.4 – Resistência à tração e variação face à argamassa de referência	51

Figura 4.5 – Resistência à compressão de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias	52
Figura 4.6 – Resistência à compressão e variação face à argamassa de referência	53
Figura 4.7 – Valor assintótico de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias	55
Figura 4.8 – Coeficiente de capilaridade de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias.....	55
Figura 4.9 – Curvas de absorção de água por capilaridade e valor assintótico de todas as argamassas.....	57
Figura 4.10 – Primeiros 60 minutos de absorção de água por ascensão capilar e coeficiente de capilaridade de todas as argamassas	58
Figura 4.11 – Taxa de secagem de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias	60
Figura 4.12 – Índice de secagem de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias	60
Figura 4.13 – Curvas de secagem de todas as argamassas	61
Figura 4.14 – Índice de secagem e taxa de secagem de todas as argamassas.....	62
Figura 4.15 – Condutibilidade térmica de todas as argamassas aos 28 e 90 dias	63
Figura 4.16 – Resistência aos sulfatos aos 28 dias	64
Figura 4.17 – Provetes após o 10º ciclo de ensaio, 28 dias	65
Figura 4.18 – Rotura dos provetes	66
Figura 4.19 – Resistência aos sulfatos aos 90 dias	66
Figura 4.20 – Resistência aos sulfatos a todas as idades.....	67
Figura 4.21 – Variações de massa de todas as argamassas aos 28 e 90 dias após o 11º ciclo	68
Figura 4.22 – Porosidade aberta de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias	69
Figura 4.23 – Massa volúmica aparente de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias.....	70
Figura 4.24 – Massa volúmica aparente e porosidade aberta de todas de todas as argamassas	71
Figura 4.25 – Porosidade aberta por porosimetria de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias	72
Figura 4.26 – Massa volúmica aparente por porosimetria de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias.....	73
Figura 4.27 – Porosimetria de mercúrio: cura M.....	74
Figura 4.28 – Porosimetria de mercúrio: cura H	75
Figura 4.29 – Porosimetria de mercúrio: cura S	76
Figura 4.30 – Difratoograma da cal NHL3.5	78
Figura 4.31 – Difratoograma do Mk.....	78
Figura 4.32 – Difratoograma da mistura de areias.....	78
Figura 4.33 – Difratoogramas das argamassas da cura M.....	80
Figura 4.34 – Difratoogramas das argamassas da cura H	82
Figura 4.35 – Difratoogramas das argamassas da cura S	83
Figura 4.36 – Curvas dTG de todas as argamassas da cura H e M.....	84
Figura 4.37 – Curvas dTG de todas as argamassas da cura H e S	85
Figura 4.38 – Cal consumida nas reações e cal livre	91

Figura 5.1 – Evolução comparativa dos parâmetros mecânicos de todas as argamassas	97
Figura 5.2 – Evolução comparativa da resistência à tração e da massa volúmica aparente	98
Figura 5.3 – Comparação entre o método hidrostático e porosimetria de mercúrio	99
Figura 5.4 – Difratoograma das argamassas da cura M	100
Figura 5.5 – Difratoograma das argamassas da cura H	101
Figura 5.6 – Difratoograma das argamassas da cura S	102
Figura 5.7 – Evolução do valor assintótico e do índice de secagem com a porosidade aberta	103
Figura 5.8 – Evolução do coeficiente de capilaridade e taxa de secagem com o comportamento aqua	105
Figura 5.9 – Parâmetros mecânicos de classificação de argamassas para rebocos e refechamento de juntas, segundo Veiga (2010)	107
Figura 5.10 – Parâmetros de classificação de argamassas para rebocos, segundo a EN 998-1:2010 ..	109
Figura 5.11 – Parâmetros mecânicos das argamassas de cal aérea, cal hidráulica natural “NHL5” e cal NHL3.5 aos 180 dias	112
Figura 5.12 – Secagem e capilaridade das argamassas de cal aérea, cal hidráulica natural “NHL5” e cal NHL3.5 aos 180 dias	113

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Diferenças mais relevantes nas cais aéreas entre as versões da norma NP EN 459-1	7
Quadro 2.2 – Diferenças mais relevantes nas cais com propriedades hidráulicas entre as versões da norma NP EN 459-1	8
Quadro 2.3 – Gama de valores requeridos para argamassas de substituição e refechamento de juntas em edifícios antigos	13
Quadro 3.1 – Série de peneiros utilizados para a análise granulométrica	19
Quadro 3.2 – Massa volúmica da água em função da temperatura.....	20
Quadro 3.3 – Valores de baridades dos constituintes das argamassas.	21
Quadro 3.4 – Quadro síntese da composição das argamassas	22
Quadro 3.5 – Quadro síntese da organização dos provetes	24
Quadro 3.6 – Patamares de pressão pré-definidos no ensaio de porosimetria de mercúrio	39
Quadro 4.1 – Traços ponderais, relação água/ligante e espalhamentos das argamassas.....	45
Quadro 4.2 – Valores médios e desvios padrão do módulo de elasticidade dinâmico.....	46
Quadro 4.3 – Valores médios e desvios padrão da resistência à tração	49
Quadro 4.4- Valores médios e desvios padrão da resistência à tração.....	52
Quadro 4.5 – Valores médios e desvio padrão do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico ...	54
Quadro 4.6 – Valores médios e desvio padrão da taxa de secagem e índice de secagem	59
Quadro 4.7 – Valores médios e desvios padrão dos valores condutibilidade térmica	63
Quadro 4.8 – Valores médios e desvios padrão dos valores de porosidade aberta e massa volúmica aparente por método hidrostático.....	69
Quadro 4.9 – Valores de porosidade aberta e massa volúmica aparente por porosimetria de mercúrio	72
Quadro 4.10 – Identificação de compostos cristalinos e notação empregue nos difratogramas das amostras	77
Quadro 4.11 – Resultados da análise por XRD, cura M	79
Quadro 4.12 – Resultados da análise por XRD, cura H.....	81
Quadro 4.13 – Resultados da análise por XRD, cura S.....	81
Quadro 4.14 – Perdas de massa nas três gamas de temperatura	86
Quadro 4.15 – Consumo de cal nas reações químicas e cal livre	90
Quadro 5.1 – Síntese de todos os resultados	94
Quadro 5.2 – Gama de valores requeridos para argamassas endurecidas para rebocos segundo a EN 998-1:2010	108
Quadro 5.3 – Designação, traço volumétrico, substituição de massa de cal por Mk e cura das argamassas estudadas por Bandeira.....	110

SIMBOLOGIA DE MATERIAIS, CURAS ENSAIOS E PARÂMETROS**Materiais**

APAS 12 – Areia de granulometria grossa.

APAS 20 – Areia de granulometria intermédia.

APAS 30 – Areia de granulometria fina.

NHL – Cal hidráulica natural 3.5 produzida em Janeiro de 2012 pela Secil Martingança.

Mk – Metacaulino Argical M 1200 S produzido pela Imerys.

S – Mistura de areias no traço volumétrico de 1 APAS12 + 1,5 APAS20 + 1,5 APAS30.

Condições de cura

H – Cura húmida, em ambiente controlado de humidade relativa 95% e temperatura 21°C.

M – Cura marítima, em ambiente natural junto ao mar (Cabo Raso).

S – Cura de referência, em ambiente controlado de humidade relativa 65% e temperatura 20°C.

Ensaio e parâmetros

TGA – Análise termogravimétrica

CC – Coeficiente de absorção de água por capilaridade

CS – Coeficiente de secagem

AB – Comportamento *Aqua*

Esp – Consistência por espalhamento

DP – Desvio padrão

XRD – Difração de raios-X

HR – Humidade relativa

IS – Índice de secagem

MVA – Massa volúmica aparente

E_{din} – Módulo de elasticidade dinâmico

P_{ab} – Porosidade aberta

MIP – Porosimetria por intrusão de mercúrio

R_c – Resistência à compressão

R_t – Resistência à tração por flexão

VA – Valor assintótico de absorção capilar

Méd – Valor médio

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e enquadramento

Desde, pelo menos, o tempo dos romanos até ao início do séc. XX, a cal aérea foi o ligante mais utilizado para a produção de argamassas de rebocos; no entanto com a descoberta dos ligantes hidráulicos durante o séc. XVIII a cal aérea foi gradualmente substituída pela cal hidráulica e, a partir dos finais do séc. XIX e início do séc. XX pelo cimento Portland, um ligante de endurecimento mais rápido e com mais elevadas características mecânicas, que passou a ser considerado como tendo melhor aplicabilidade em obra. Pouco a pouco a cal aérea foi desaparecendo dos estaleiros de obras [FARIA *et al.*, 2008; MARTÍNEZ-RAMÍREZ *et al.*, 1995]. Em grande parte o desuso da cal aérea ficou a dever-se à necessidade de preparar pastas para extinguir a cal viva, à poeira cáustica resultante da finura da cal em pó, e também à tendência dos aplicadores privilegiarem o endurecimento rápido e a resistência elevada a curto prazo [FARIA-RODRIGUES, 2004]; também questões de opção por novos produtos, vistos como de características muito melhores e mais duráveis (que depois se vieram a mostrar nem sempre verdadeiras) relegando produtos mais antigos, contribuíram para essa situação.

Embora a cal hidráulica tenha vindo a ser produzida em Portugal, esta nunca chegou a ter uma grande aplicabilidade em argamassas e nomeadamente em rebocos, talvez pelo seu aparecimento no mercado não ter sido muito anterior ao aparecimento do cimento, e terem sido reconhecidas características de alguma falta de homogeneidade na sua produção.

Hoje em dia parte dos edifícios do parque habitacional português tem mais de 40 anos de idade, sendo que cerca de um quarto dos edifícios foram construídos depois de 1991. Ainda que exista uma percentagem de edifícios de construção antiga, a maior parte do parque habitacional português é de construção relativamente recente, [GANHÃO, 2011].

Muitos dos edifícios (desde os mais antigos aos mais recentes) apresentam deficiências ao nível dos rebocos exteriores, o que fez aumentar cada vez mais a necessidade de intervenções sobre esses rebocos. Face à atual crise, nacional e internacional, no setor da construção, a reabilitação e conservação de edifícios e de outras construções surge como uma oportunidade de trabalho. Como tal, a investigação para o conhecimento das características de melhores soluções de argamassas para intervenção nos rebocos de edifícios ganha importante relevo.

A publicação da nova versão da norma europeia EN 459-1: 2010 [CEN, 2010] e a entrada em vigor da nova versão da norma NP EN 459-1: 2011 [IPQ, 2011] em Portugal (em Julho de 2012) redefiniu os pressupostos que definem nomeadamente as cals hidráulicas naturais (NHL), e conduziu ao desenvolvimento em meio empresarial de cals hidráulicas que, segundo esta norma, fossem efetivamente classificadas como NHL [FARIA *et al.*, 2012a]. Surgiu então no mercado nacional, em Janeiro de 2012, uma NHL3.5.

Assente nestes pressupostos partiu-se então para a investigação do comportamento das argamassas com base em cal hidráulica natural de produção nacional, mais concretamente a cal hidráulica natural 459-1 NHL3.5.

Este trabalho enquadra-se nos trabalhos desenvolvidos no âmbito dos projetos *FCTMETACAL*, que tem como objetivo o estudo e otimização de argamassas com base em cal e metacaulino e ainda alguns dos desenvolvidos no âmbito do projeto *LIMECONTECH*, que pretende contribuir para um maior avanço do conhecimento relativo à conservação de revestimentos com base em cal.

A cal hidráulica natural 459-1 NHL3.5 utilizada é uma cal com propriedades hidráulicas, mas com elevado teor em Ca(OH)_2 e, como tal, potencialmente compatível para aplicação na reabilitação de alvenarias não só recentes mas também antigas. É uma cal produzida a cerca de metade da temperatura necessária para a produção do cimento, de onde advêm vantagens energéticas evidentes face ao cimento, [FARIA *et al.*, 2012a]. Não se sabe se a utilização de metacaulino em argamassas de NHL3.5 se traduz, ou não, em vantagens para as argamassas produzidas.

A utilização de metacaulino em argamassas de cal aérea confere às argamassas de cal características hidráulicas e eventuais melhorias ao nível dos comportamentos mecânicos e de durabilidade [FARIA, 2009].

Face aos poucos trabalhos desenvolvidos com esta cal, de produção recente, às evidentes vantagens económicas e ambientais que a produção desta cal pode trazer face ao tradicional cimento Portland, reveste-se de grande comicidade conhecer e otimizar as propriedades de argamassas realizadas com base na cal hidráulica natural 459-1 NHL3.5 e poder classificar as suas hipóteses de utilização quanto aos usos.

1.2 Objetivos

O objetivo estabelecido para esta dissertação é conhecer as características de argamassas realizadas com base em cal hidráulica natural NHL3.5, ao traço volumétrico de 1:3 de cal e areia, tendo em conta a influência de substituições parciais de massa de cal hidráulica natural por metacaulino, das condições de cura e a evolução com a idade. As características que se pretendem conhecer são mecânicas, físicas, químicas e microestruturais.

Nesse sentido pretende-se dar um contributo para o conhecimento das características de argamassas que possam ser produzidas na atualidade, contribuindo também para um melhor conhecimento sobre o comportamento e adequabilidade de aplicação destas argamassas essencialmente na reabilitação e conservação de rebocos ou no refechamento de juntas em edifícios antigos ou mais recentes existentes.

1.3 Estrutura e organização do texto

A dissertação está dividida em seis capítulos. No presente capítulo é apresentado um enquadramento do tema, assim como os objetivos do trabalho e a estruturação do texto desta dissertação.

Num segundo capítulo apresenta-se o estado de conhecimentos atual, na área dos ligantes de cal e mais concretamente da cal hidráulica natural e sua normalização, na área dos componentes pozolânicos e mais especificamente o metacaulino, na área das argamassas de rebocos (considerada como uma aplicação com requisitos mais restritos face a outros tipos de aplicação de argamassas) e em resultados de trabalhos de referência realizados com argamassas para comparação e enquadramentos de resultados.

Num terceiro capítulo descrevem-se todos os passos efetuados na campanha experimental do trabalho, onde se podem encontrar os materiais utilizados para produzir as argamassas, todo o planeamento da produção das argamassas e provetes, as curas a que foram sujeitos e a organização e descrição dos ensaios de caracterização realizados.

No quarto capítulo são apresentados todos os resultados decorrentes dos ensaios de caracterização das argamassas em tabelas e figuras, fazendo-se também uma comparação dos resultados entre as diferentes argamassas, que variam em função da percentagem em metacaulino e curas a que os respetivos provetes foram submetidos.

No quinto capítulo serão analisados mais em pormenor os resultados, cruzando-se os resultados dos vários ensaios realizados para a caracterização das argamassas e comparando-os com resultados e gamas de valores obtidos em referências bibliográficas consultadas.

No sexto e último capítulo, apresenta-se uma síntese dos principais resultados tratados ao longo do trabalho, bem como temas de trabalhos futuros passíveis de serem realizados no âmbito do tema desta dissertação.

Nos anexos apresentam-se as fichas técnicas dos materiais (NHL e Mk), dados meteorológicos das curas M e H, alguns quadros com resultados da campanha experimental e alguns trabalhos expostos no desenvolvimento desta dissertação.

2 ESTADO DOS CONHECIMENTOS

2.1 Matérias-primas das argamassas com base em cal hidráulica

2.1.1 A cal hidráulica

No séc. XVIII com a necessidade de desenvolver as instalações portuárias da grande potência mundial que era a Inglaterra, o fenómeno da hidraulicidade das argamassas foi estudado pelo engenheiro inglês John Smeaton (1724 – 1792), que após uma série de experiências em busca dos fundamentos para conseguir o endurecimento das argamassas dessas obras, na presença de água - argamassas essas constituídas apenas por cal e pozolanas - afirmava que a presença de argila nos calcários conferia, após a calcinação, notáveis melhorias na argamassa. No ano de 1812 o químico e professor francês Collet-Descotils (1773 - 1815) descobriu que a combinação de cal com a sílica dissolvida após a cozedura de calcários siliciosos, conferia-lhe propriedades hidráulicas [ALVAREZ *et al.*, 2005].

Louis Vicat (1786-1861) engenheiro francês do séc. XIX, baseado nos pressupostos de Smeaton e Collet-Descotils, foi segundo muitos autores quem primeiramente provou que a queima de calcários com argilas originava novos compostos que conferiam propriedades hidráulicas ao ligante produzido. O nível de hidraulicidade depende portanto da quantidade de argila contida nos calcários, da temperatura da cozedura e da duração da cozedura a essa temperatura [FARIA-RODRIGUES, 2004; CARNEIRO, 2012].

A cal hidráulica natural é produzida a partir da cozedura de calcários com teor máximo de 20% de argilas magras - a temperaturas na ordem dos 900°C a 1200°C [FARIA *et al.*, 2012a e b] - formando óxido de cálcio, CaO, silicatos e aluminatos. Com o aquecimento por volta dos 400 a 600°C a argila decompõe-se em sílica e alumina que combinadas com o óxido de cálcio a temperaturas entre os 900 e 1200°C, geram silicatos e aluminatos de cálcio, ainda que algo diferentes dos encontrados no fabrico do cimento, sendo de destacar a formação do silicato bicálcico, C₂S (belite), fase hidráulica proeminente da cal hidráulica natural, do aluminato tricálcico, C₃A (celite) e do alumino ferrato tetracálcico, C₄AF (ferrite) [FARIA-RODRIGUES, 2004]. Ao nível do fabrico, a cal necessita ainda de ser extinta com água para que o óxido de cálcio livre se transforme em hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂ [VELOSA, 2006].

Às reações químicas de hidratação do silicato bicálcico com a água, transformando-se em silicato de cálcio hidratado, dá-se o nome de fase hidráulica da cal. A hidratação dos aluminatos e silicatos de cálcio proporciona a presa da argamassa e naturalmente o ganho de consistência, e é uma fase semelhante à produzida na hidratação do cimento. A cal livre presente na forma de óxido de cálcio, transforma-se em hidróxido de cálcio por extinção com água, dando-se depois a sua carbonatação com o auxílio do dióxido de carbono atmosférico, CO₂ - processo pelo qual ocorre a

transformação do hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio, CaCO_3 . Esta reação vai provocar a variação da microestrutura da argamassa e conseqüentemente uma alteração das suas características mecânicas e físicas, e é uma fase semelhante à que ocorre na cal aérea [SOUSA-COUTINHO, 1988a e b; CARNEIRO, 2012; FARIA-RODRIGUES, 2004].

2.1.1.1 A norma NP EN 459-1:2011 -vs- NP EN 459-1:2002, o que mudou?

A nível europeu, até ao ano de 2010, a constituição das cais de construção obedecia à norma EN 459-1: 2001 [CEN, 2001], que tinha sido transposta na NP EN 459-1: 2002 [IPQ, 2002a]. Esta norma foi atualizada pela nova versão europeia de 2010 [CEN, 2010], que foi transposta para a NP EN 459-1:2011 [IPQ, 2011]. Esta nova versão da norma de classificação das cais de construção redefiniu a constituição das cais com propriedades hidráulicas. Atualmente a norma encontra-se em vigor em Portugal desde Julho de 2012, revestindo-se de grande importância analisar o que mudou. Pela atualidade do assunto, optou-se por não analisar exclusivamente o que mudou ao nível das cais hidráulicas naturais, onde se insere a cal utilizada neste trabalho.

Ao invés dos quatro grupos de cais presentes na versão da norma de 2002 - *cais dolomíticas* (DL) (nas formas hidratada (S), semi-hidratadas, totalmente hidratadas e viva (Q)), *cais cálcicas* (CL) (nas formas hidratada (S) e viva (Q)), *cais hidráulicas* (HL) e *cais hidráulicas naturais* (NHL ou NHL-Z) - a versão de 2011 divide as cais de construção apenas em dois grandes grupos (Figura 2.1): as *cais aéreas* e as *cais com propriedades hidráulicas* [IPQ, 2002a; IPQ, 2011].

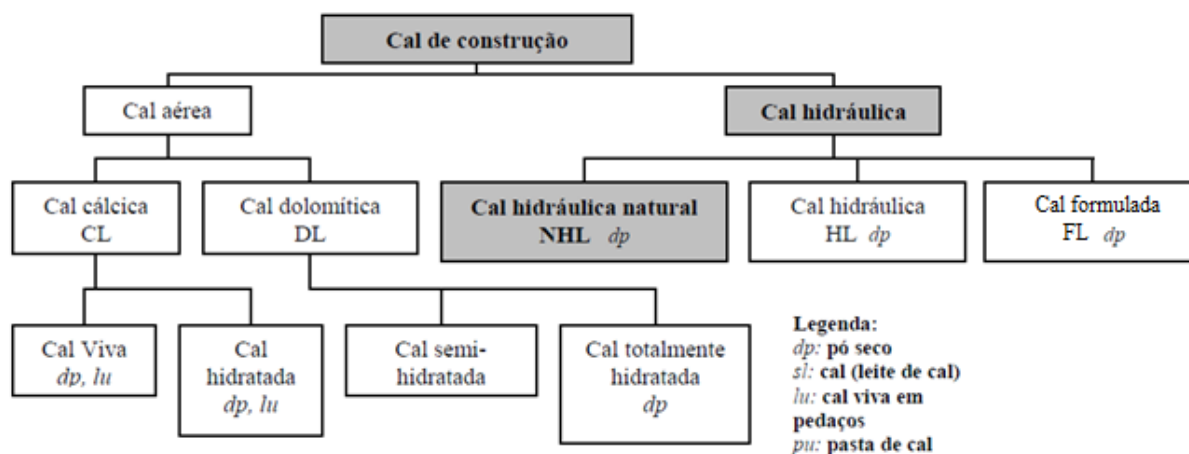


Figura 2.1 – Cais de construção [IPQ, 2011]

Nas *cais aéreas* encontram-se duas subfamílias: as *cais cálcicas* (CL), constituídas na sua maioria por óxido de cálcio ou hidróxido de cálcio sem adições hidráulicas, e as *cais dolomíticas* (DL), constituídas por óxido de cálcio e magnésio, ($\text{CaO}+\text{MgO}$), ou hidróxido de cálcio e magnésio, ($\text{Ca(OH)}_2+\text{Mg(OH)}_2$) sem quaisquer adições hidráulicas, e que podem existir nas formas viva (Q) ou hidratada (S – em pó, S PL – em pasta ou S ML – na forma de leite de cal). Por sua vez as cais hidráulicas subdividem-se em três famílias: as *cais hidráulicas naturais* (NHL) – cais com

propriedades hidráulicas produzida através da queima de calcários argilosos ou siliciosos e sua redução a pó por extinção com ou sem moagem sem quais quer outros aditivos, que endurecem por hidratação ou carbonatação – as *cais formuladas* (FL) – cais de propriedades hidráulicas constituídas por CL ou NHL a que se junta material hidráulico e que têm a capacidade de endurecer por hidratação ou carbonatação, (família de cais não definida na norma de 2002) – e as *cais hidráulicas* (HL) – constituídas por cal e materiais como cimento e pozolanas, tendo a propriedade de endurecer por hidratação com o contributo do dióxido de carbono para esse endurecimento, [IPQ, 2011].

Quanto às classificações e requisitos químicos existem também alterações que devem ser destacadas, como se pode constatar no Quadro 2.1. Em relação às cais DL e CL pode verificar-se que estas classificavam-se na norma de 2002 de acordo com a percentagem mássica de CaO+MgO como: CL90, CL80, CL70, DL85 e DL80, não existindo em nenhuma delas qualquer restrição quanto a percentagem de cal disponível. Na versão da norma de 2011 as CL classificam-se de igual modo (de acordo com a percentagem mássica de CaO+MgO) mas com a diferença de ter de existir uma percentagem mínima de cal disponível; já as cais DL são na norma de 2011 classificadas de acordo com as percentagens mássicas de CaO+MgO e MgO como DL-30, DL 90-5, DL 85-30 e DL 80-5.

Quadro 2.1 – Diferenças mais relevantes nas cais aéreas entre as versões da norma NP EN 459-1 (baseado em IPQ, 2002a e IPQ 2011)

Tipo de cal	Valores em % em massa									
	CaO+MgO		MgO		CO ₂		SO ₃		Cal disponível	
	2002	2011	2002	2011	2002	2011	2002	2011	2002	2011
CL 90	≥ 90	≥ 90	≤ 5	≤ 5	≤ 4	≤ 4	≤ 2	≤ 2	-	≥ 80
CL 80	≥ 80	≥ 80	≤ 5	≤ 5	≤ 7	≤ 7	≤ 2	≤ 2	-	≥ 65
CL 70	≥ 70	≥ 70	≤ 5	≤ 5	≤ 12	≤ 12	≤ 2	≤ 2	-	≥ 55
DL 85	≥ 85	NE	≤ 30	NE	≤ 7	NE	≤ 2	NE	-	NE
DL 80	≥ 80	NE	≤ 5	NE	≤ 7	NE	≤ 2	NE	-	NE
DL 90-30	NE	≥ 90	NE	≤ 30	NE	≤ 6	NE	≤ 2	NE	NA
DL 90-5	NE	≥ 90	NE	< 5	NE	≤ 6	NE	≤ 2	NE	NA
DL 85-30	NE	≥ 85	NE	≤ 30	NE	≤ 9	NE	≤ 2	NE	NA
DL 80-5	NE	≥ 80	NE	< 5	NE	≤ 9	NE	≤ 2	NE	NA

NE – Não classificável na norma

NA – Não aplicável, sem valor de referência na norma

Nas normas correspondentes surgem notas associadas a alguns valores

... – Alterações

As cais com propriedades hidráulicas que surgiam na norma de 2002 eram classificadas de acordo com os valores da resistência à compressão em MPa aos 28 dias como, NHL 2 e HL2, NHL 3.5 e HL3.5 e NHL 5 e HL 5; continuam a ser designadas dessa forma na norma de 2011 mas surgem também agora as cais, FL 2, FL 3.5 e FL 5. Nas cais anteriormente existentes as diferenças entre as

normas registam-se principalmente nas percentagens exigidas de sulfatos, SO_3 , cal livre e nos tempos de presa como se pode constatar no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Diferenças mais relevantes nas cais com propriedades hidráulicas entre as versões da norma NP EN 459-1 (baseado em IPQ, 2002a e IPQ 2011)

Tipo de cal	Valores em % em massa				Tempos de presa [h]			
	SO_3		Cal disponível		Inicial		Final	
	2002	2011	2002	2011	2002	2011	2002	2011
NHL 2	≤ 3	≤ 2	≥ 15	≥ 35	> 1	> 1	≤ 15	≤ 40
NHL 3.5	≤ 3	≤ 2	≥ 9	≥ 25				≤ 30
NHL 5	≤ 3	≤ 2	≥ 3	≥ 15				≤ 15
HL 2	≤ 3	≤ 3	≥ 8	≥ 10				
HL 3.5	≤ 3	≤ 3	≥ 6	≥ 8				
HL 5	≤ 3	≤ 3	≥ 3	≥ 4				
FL 2	NE	≤ 2	NE	≥ 40 < 80	NE	> 1	NE	≤ 40
FL 3.5	NE	≤ 2	NE	≥ 25 < 50	NE		NE	≤ 30
FL 5	NE	≤ 2	NE	≥ 15 < 40	NE		NE	≤ 15

NE – Não classificável na norma

NA – Não aplicável, sem valor de referência na norma

... – Alterações

* – Para notas sobre os valores consultar as normas correspondentes

No entanto, e particularmente no caso das cais atualmente designadas por NHL, atualmente não é possível proceder a quaisquer adições na matéria-prima, para além da rocha calcária e da argila. Devido às mudanças da norma em vigor é importante que os produtores de cal revejam as formulações das suas cais uma vez que muitas cais com propriedades hidráulicas antes classificadas como NHL, de acordo com a nova versão da norma, passarão a ser classificadas como HL ou FL. As reformulações podem ocorrer ao nível das matérias-primas e/ou dos processos de fabrico, de modo a cumprir os requisitos respeitantes à NHL em causa.

2.1.2 Componentes pozolânicos

Embora utilizadas e referidas antes, durante o período do império Romano, as pozolanas naturais e artificiais foram muito usadas quando eram necessárias características hidráulicas, para melhorar a resistência à água e a durabilidade de argamassas à base de cal [MACIEL, 2009].

O desejo de melhorar o desempenho dos ligantes hidráulicos tem levado ao aumento da utilização de materiais pozolânicos. As pozolanas são substâncias de composição siliciosa ou silico-aluminosa, que por si próprias não endurecem quando hidratadas; no entanto, quando são finamente moídas e hidratadas reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio formando compostos – como

silicatos e aluminatos de cálcio hidratados – que têm propriedades hidráulicas. [SAID-MANSOUR, 2011; DONATELLO *et al.*, 2010; VELOSA, 2006; FARIA, 2004].

A reação entre os compostos siliciosos ou silico-aluminosos com o hidróxido de cálcio é definida como reatividade pozolânica; para que esta ocorra é importante que a sílica e a alumina não se encontrem em elevado grau de cristalinidade; como tal, a reatividade está diretamente ligada a estrutura interna da pozolana. Para além do teor de sílica e de alumina ativa (não cristalina), também a superfície específica constituem fatores intrínsecos que têm grande influência na reatividade da pozolana [COUTINHO, 1988a; CACHIM *et al.*, 2010].

O interesse no uso de pozolanas tem vindo a aumentar. As argamassas onde os ligantes são substituídos parcialmente por pozolanas – possibilitando assim um menor gasto de ligante – têm vantagens evidentes ao nível ambiental e económico. As emissões de dióxido de carbono são reduzidas, uma vez que o fabrico dos ligantes hidráulicos necessita de um grande gasto de energia para gerar as elevadas temperaturas de cozedura das matérias-primas, superiores às que eventualmente são necessárias para produzir algumas pozolanas artificiais [FARIA, 2009]; por outro lado, como as pozolanas resultam mais económicas que os ligantes hidráulicos, a utilização da mistura dos dois tipos de materiais como ligante apresenta também uma redução dos encargos com a produção dessas argamassas [DONATELLO *et al.*, 2010; CACHIM *et al.*, 2010]

As pozolanas podem ser obtidas de várias formas, podendo ser naturais, de origem sedimentar ou na sua maioria de origem vulcânica (resultante de lava meteorizada), ou artificiais, quando são produzidas principalmente por tratamento térmico e moagem de materiais naturais, como argilas e algumas rochas siliciosas (como é exemplo o metacaulino), resultantes das cinzas da queima de produtos vegetais (caso das cinzas de casca de arroz), podendo resultar diretamente também de subprodutos industriais moídos (por exemplo de alguma cerâmica) ou derivados dos processos de queima de combustíveis (como é o caso das cinzas volantes de carvão e biomassa) [VEIGA *et al.*, 2010; VELOSA, 2006; DONATELLO *et al.*, 2010; FARIA, 2004; ALMEIDA *et al.*, 2008].

2.1.2.1 Metacaulino

A designação caulino deriva da palavra chinesa Kau-ling (alta cordilheira), nome da localidade chinesa onde este material era extraído. É pelo menos conhecida a sua utilização como pozolana desde a construção da barragem de Jupia, no Brasil, em 1962, onde foi incorporado no betão [VELOSA, 2006].

O metacaulino é um material pozolânico artificial com origem natural, de granulometria muito fina. Não sendo um material novo, tem pouca visibilidade e uso em Portugal, embora haja condições propícias para a produção deste material em termos de recursos, pois as argilas cauliníticas são relativamente abundantes no território nacional. A inibição da reação alcalis-sílica no betão é uma

das principais vantagens conhecidas da aplicação do metacaulino nesse material [SANTOS-SILVA, 2011].

O metacaulino é obtido a partir da calcinação de argilas ricas em caulinite (caulinos) a temperaturas entre 600 a 900°C. O comportamento do caulino durante a fase de aquecimento traduz-se na perda da água adsorvida por volta dos 100°C e na sua desidratação por volta dos 500°C, com a formação de metacaulino. Uma continuação do aquecimento, para temperaturas na ordem dos 900°C, permite a nucleação de mulite, e o desenvolvimento da fase vítrea [VELOSA, 2006; SANTOS-SILVA, 2011], diminuindo por isso a sua reatividade.

A reatividade pozolânica de um metacaulino depende da cristalinidade de origem, da superfície específica e da granulometria e do grau de amorfização. Otimizando todas estas características é possível tirar o máximo partido da utilização do metacaulino [SAMPAIO *et al.*, 2001].

2.1.3 Agregados - areias

Os agregados são os constituintes que se podem encontrar numa argamassa em maior quantidade e têm uma preponderante influência sobre a estrutura porosa do material endurecido. A sua escolha deve ser rigorosa porque pequenas variações nas suas características podem modificar as propriedades finais das argamassas [MELO & CARNEIRO, 2010; RATO, 2006].

Um ponto importante sobre as areias é a distribuição de tamanhos das partículas e a sua forma. Com uma boa combinação de diferentes de tipos agregados, é possível obter curvas granulométricas otimizadas, pois uma melhoria da distribuição e rearranjo dos agregados pelos vazios das argamassas conduz a argamassas com melhor trabalhabilidade, compacidade e resistências mecânicas. Já a forma é determinante no valor da superfície específica da areia, influenciando a quantidade de água nas amassaduras e as variações comportamentais que lhe estão associadas [RATO, 2006; MELO & CARNEIRO, 2010; CARNEIRO, 2012].

Do ponto de vista químico as areias provêm da desagregação de rochas, podendo distinguir-se essencialmente dois grupos: as areias siliciosas e as calcárias. As areias siliciosas provêm geralmente dos rios, enquanto as calcárias provêm dos desperdícios de pedreiras e britagem de rochas calcárias. As areias podem conter maior ou menor percentagem de argila. Devido aos finos da argila, as areias conferem uma maior trabalhabilidade e resistência às argamassas, podendo no entanto reduzir a ligação do agregado ao ligante, implicando por isso uma adição de maior quantidade de água e consequente incremento nos fenómenos de retração [FARIA, 2004; RATO, 2006]. Em Portugal, relativamente à sua origem podemos encontrar areias de areeiro, das jazidas ou dos leitos de rio – origem natural – sendo estas as mais utilizadas, ou resultantes da fragmentação de rochas. Relativamente à constituição mineralógica as areias mais comuns são as siliciosas, constituídas na sua maioria por quartzo [RATO, 2006; CARNEIRO, 2012].

Segundo um estudo desenvolvido por Lanas [LANAS *et al.*, 2004] em argamassas com base em cal hidráulica natural, as características dos agregados têm relações diretas com a resistência e porosidade. Agregados de pedra calcária contribuem para incrementos de resistências mecânicas; agregados de forma arredondada causam o aumento do tamanho dos poros e conseqüente redução das resistências mecânicas, sendo portanto o seu uso não aconselhável; agregados de granulometria mais fina apresentam uma boa coesão na interface agregado/ligante, melhorando as resistências mecânicas.

Em suma, e segundo Bessey [BESSEY, 1966], os principais fatores que influenciam a qualidade de uma areia destinada ao fabrico de argamassas são: a dimensão média das partículas, a amplitude do intervalo das dimensões das partículas, a forma das partículas uma granulometria extensa e completa e as impurezas contidas na areia com destaque para a argila.

2.2 Argamassas

2.2.1 Considerações de base

Ao longo da sua evolução o Homem procurou sempre aperfeiçoar os seus locais de abrigo e foi nesse seguimento que as técnicas e processos de construção evoluíram. Da mesma forma foi evoluindo o conhecimento dos materiais de construção.

Desde há pelo menos milhares de anos que as argamassas estão associadas às construções do Homem. São longínquos os primeiros usos explícitos de argamassas; as primeiras mais conhecidas datam de há mais de 10 000 anos e foram encontradas na localidade da Galileia, atual estado de Israel, sendo que mais tarde foram encontradas nas cisternas de Jerusalém argamassas hidráulicas trabalhadas pelos Fenícios [ALVAREZ *et al.*, 2005]. No entanto, já no período pré-histórico se utilizavam argamassas ou pastas de terra como ligante para o revestimento de fossas ou de estruturas vegetais em cabanas (os designados “barros de cabanas”) [BRUNO & FARIA, 2008].

As aplicações das argamassas podem ser bem diversas, desde revestimentos exteriores e interiores de paredes, refechamento de juntas, assentamento de alvenarias, betonilhas em pisos, e embora os materiais adotem a mesma denominação – argamassas – estes são aplicados em situações distintas, que requerem requisitos também diferentes, pelo que as argamassas devem ser também diferentes [HENRIQUES & FARIA, 2008].

Em aplicações na reabilitação de construções, nem todos estes tipos de aplicações estão presentes.

Durante a existência de um edifício as alvenarias exteriores dos edifícios estão sujeitas a diversos agentes de agressão externas, nomeadamente à ação da água. Como tal é necessário revestir os paramentos exteriores das alvenarias com camadas de proteção, tendo nessa função as argamassas de reboco um papel importante.

2.2.2 Reabilitação e conservação de rebocos de alvenarias de edifícios

Um dos parâmetros mais importantes a considerar para aplicar argamassas de rebocos de edifícios é a compatibilidade da argamassa a aplicar com o suporte que a recebe. A compatibilidade de argamassas de substituição deve ser assegurada em termos mecânicos, físicos e químicos: do ponto de vista mecânico deve ser assegurada que a resistência à flexão e à compressão dos materiais a aplicar não excede a dos materiais pré-existentes; no entanto, são necessárias resistências mecânicas adequadas às ações (reduzidas) a que os rebocos vão estar sujeitos; fisicamente, o comportamento hídrico das argamassas a aplicar é também importante, pois estas não podem descontinuar a permeabilidade ao vapor de água da alvenaria nem a absorção de água por capilaridade - estas não devem bloquear a passagem de vapor de água circulante devido ao gradiente da pressão do vapor de água entre o interior e o exterior; ainda devem apresentar um bom comportamento face à ação do gelo-degelo; do ponto de vista químico é também importante que as argamassas não introduzam elevados teores de sais solúveis nos suportes onde são aplicadas e, dentro do possível, sejam concebidas para resistir aos efeitos da cristalização de sais [VEIGA *et al.*, 2010; LANAS & ALVAREZ, 2003]

A necessidade de poder ter de proceder periodicamente à substituição parcial ou integral dos rebocos antigos, quando se encontrem em elevado estado de degradação, determina que esse procedimento deva assumir as características de uma operação de manutenção corrente. Muitas vezes os novos rebocos aplicados revelam uma reduzida compatibilidade com os suportes, constituindo-se assim como soluções pouco duráveis e potencialmente geradoras de novos modos de degradação das alvenarias [GUERREIRO *et al.*, 2007].

Muitas reabilitações de edifícios antigos têm recorrido à aplicação de argamassas à base de cimento na substituição de rebocos; tal facto tem causado efeitos adversos nas paredes antigas, uma vez que as argamassas de cimento são muitas vezes demasiado rígidas, e muito impermeáveis à água, quer na forma líquida, quer em vapor, o que contribui para uma degradação gradual dos suportes. Quando um reboco à base de cimento fendilha ou fissura, a água penetra facilmente na forma líquida, progredindo ao longo da espessura do reboco e da parede de suporte; se depois não consegue evaporar-se na forma de vapor, quando inverte o seu sentido de progressão, vai concentrar-se na espessura anterior à barreira ao vapor que o reboco acaba por constituir, podendo causar sérios estragos à própria parede, e especialmente se ao longo do seu percurso a água contactar e passar a transportar sais [MOSQUERA *et al.* 2006; FARIA, 2009].

Ao nível de trabalhos com estudos de caracterização de argamassas para edifícios antigos há que ter em conta os trabalhos coordenados e desenvolvidos por Veiga [VEIGA, 2010] que definiu uma gama de valores requeridos para argamassas de substituição e refechamento de juntas em edifícios antigos, Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Gama de valores requeridos para argamassas de substituição e refechamento de juntas em edifícios antigos [VEIGA, 2010]

Tipo de argamassas	Características mecânicas aos 90 dias			Comportamento à água
	R_t [N/mm ²]	R_c [N/mm ²]	E_{din} [N/mm ²]	CC [kg/(m ² .min ^{0,5})]
Reboco exterior	0,2 - 0,7	0,4 - 2,5	2000 - 5000	< 1.5; > 1.0
Reboco interior	0,2 - 0,7	0,4 - 2,5	2000 - 5000	-
Refechamento de juntas	0,4 - 0,8	0,6 - 3,0	3000 - 6000	< 1.5; > 1.0

É muito importante, antes de se proceder a uma intervenção num edifício, o conhecimento da sua constituição quer ao nível estrutural, como ao nível do revestimento das alvenarias e ao nível do uso do edifício, uma vez que os materiais existentes e os materiais que serão usados na sua reabilitação têm de ser compatíveis. O estabelecimento de um programa de análise exaustiva das anomalias presentes, a elaboração de um correto diagnóstico, o conhecimento da natureza e estado do suporte e o clima local, têm importância fulcral na definição de soluções de intervenção, nomeadamente na especificação de argamassas para edifícios antigos, em que os rebocos possuem grande relevância no seu revestimento e proteção.

2.2.3 Argamassas à base de cal hidráulica

Argamassas à base de cal foram utilizadas principalmente em edifícios até à segunda metade do séc. XIX, quando começaram a ser substituídas por um novo ligante: o cimento Portland. As vantagens aparentes do uso de cimento Portland, tal como maior resistência e rápido endurecimento, causaram o desuso progressivo das argamassas de cal e uma conseqüente perda de conhecimento sobre as tecnologias de preparação e aplicação, as propriedades e características de argamassas de cal [VEIGA *et al.*, 2010; MOSQUERA *et al.*, 2006].

Em termos de características, as argamassas de cal hidráulica deverão enquadrar-se, de um modo geral, entre as argamassas de cal aérea e as argamassas de cimento [FARIA-RODRIGUES, 2004].

Uma das características fundamentais das argamassas com base em cal hidráulica é o facto de possuírem dois tipos de reatividade ou duas fases de endurecimento, uma hidráulica, realizada em contacto com a água, e outra aérea, realizada em contacto com o dióxido de carbono do ar. O endurecimento inicial advém da reação de hidratação que resulta na formação de uma estrutura de silicato de cálcio hidratado. Após o endurecimento inicial, o hidróxido de cálcio presente vai continuar a reagir com o dióxido de carbono atmosférico; esse processo de carbonatação vai criar um aumento do volume que enche os poros e fissuras de superfície, reduzindo o número de vias de difusão da propagação do dióxido de carbono a grandes profundidades no reboco [CARNEIRO, 2012; LANAS *et al.*, 2004; ALLEN & BALL, 2012]

Argamassas de cal hidráulica (então classificada como natural mas sendo não natural segundo a atual versão da norma das cais de construção [IPQ, 2011]) estudadas por Veiga [VEIGA, 2006] ao traço volumétrico 1:4 de cal e areia, revelaram ter resistências mecânicas adequadas para aplicação em rebocos de edifícios novos e na substituição de rebocos em edifícios antigos; no entanto o comportamento à água dessas argamassas revelou-se desadequado para aplicação em rebocos.

Devido à recente entrada em vigor da norma NP EN 459-1 [IPQ, 2011] escassos são os estudos efetuados sobre a caracterização de argamassas com base em cais hidráulicas naturais classificadas segundo a nova norma.

Ao nível das argamassas de cal hidráulica natural, Bandeira [BANDEIRA, 2012] realizou um trabalho, também no âmbito dos projetos *FCTMETACAL* e *LIMECONTECH*, que visou o estudo das características de uma cal hidráulica natural designada como NHL5. No entanto, como a cal utilizada nesse estudo tinha sido produzida em Outubro de 2011, e a nova versão da norma ainda não estava obrigatoriamente em vigor, não havendo portanto garantias de que fosse efetivamente uma NHL5 (comparando os resultados obtidos com os que se vão apresentar no presente estudo, talvez seja uma NHL mas mais “fraca” que a NHL5). Sabe-se que a NHL5 atualmente produzida pelo mesmo fabricante (Secil Martingança) sofreu algumas alterações desde o lote produzido em Outubro de 2011. No estudo em causa verificou-se que uma cura húmida (HR=95%) favoreceu a obtenção de argamassas com melhores características mecânicas, concluindo-se também que as características das argamassas com a cal NHL5 de Outubro de 2011 apresentavam um comportamento melhorado face as antigas cais NHL5 (classificadas de acordo com a versão anterior da norma).

O estudo de Gulotta, [GULOTTA *et al.*, 2013] sobre argamassas de cal hidráulica natural (não é feita referência a qual a versão da norma de classificação, pelo que se desconhece se a cal utilizada é efetivamente uma cal hidráulica natural classificada segundo a versão atual da norma) mostrou que o comportamento hidráulico dessas argamassas depende principalmente da presença do silicato bicálcico. Nesse mesmo estudo conclui-se, após a caracterização mecânica das argamassas, que as atribuições das classes da cal NHL por si só não podem ser consideradas como indicador de confiança do comportamento mecânico dos materiais na produção dessas argamassas; na verdade, as três classes definidas pelo atual padrão NHL têm amplas áreas sobrepostas e são incapazes de descrever cuidadosamente o comportamento final das argamassas. Nesse mesmo estudo a avaliação da evolução da porosimetria e porosidade das argamassas indica que os valores de porosidade total variam dentro de um intervalo limitado, enquanto a distribuição do tamanho dos poros é um parâmetro crítico que apresenta variações mais significativas.

2.2.4 Argamassas à base de cal hidráulica e metacaulino

As pozolanas, materiais com elevada superfície específica, ricos em sílica e/ou alumina no estado amorfo, no passado foram materiais muito usados em argamassas, caindo em desuso ao longo

dos tempos. Recentemente têm vindo a ser reconhecidas como promovendo argamassas com melhorias técnicas económicas e ambientais [FARIA-RODRIGUES, 2004].

O metacaulino tem sido usado em argamassas ao longo dos séculos com bons resultados; um estudo recente de investigadores gregos [AGGELAKOPOULOU *et al.*, 2011] revelou que argamassas de cal e metacaulino aplicadas num portal genovense do século XV apresentavam hoje em dia um estado de conservação excelente e uma elevada adesão da matriz de agregados e da camada de base ao substrato.

Presentemente são poucos os estudos de caracterização química, mecânica e física de argamassas de reboco de cal hidráulica com adição de metacaulino, nomeadamente de cal NHL 3.5.

Num estudo de Vejmelková, [VEJMEJKOVÁ *et al.*, 2012] que mediu uma ampla gama de propriedades de argamassas de cal hidráulica com metacaulino, avaliou-se que uma substituição mássica de 20% de cal por metacaulino era uma boa opção. O investigador considerou que essa solução otimiza as argamassas, melhorando as suas características mecânicas em relação à argamassa de referência, reduzindo também o coeficiente de absorção de água por capilaridade em cerca de 20%.

A influência das condições de cura é também um parâmetro a considerar para o desenvolvimento das características das argamassas de cal hidráulica e metacaulino. Cachim [CACHIM *et al.*, 2010] estudou essa influência nas argamassas de cal NHL5 (classificadas segundo a versão antiga da norma [IPQ, 2002]), e conclui que uma cura húmida (HR=95%) melhorava as características mecânicas, físicas e químicas, concluindo também nesse estudo que uma substituição de 20% de cal por metacaulino apresenta os melhores resultados.

Ao nível das argamassas de cal hidráulica com metacaulino, no trabalho realizado por Carneiro [CARNEIRO, 2012], este conclui que uma substituição de 10% de cal por metacaulino otimiza as características das argamassas ao nível mecânico em idades jovens, estabilizando em idades mais avançadas, provando-se ser adequadas para aplicação em rebocos de edifícios antigos.

Com base nas conclusões dos vários trabalhos consultados a nível da bibliografia, considera-se que as argamassas de cal hidráulica natural, com ou sem incorporação de metacaulino podem apresentar características muito interessantes, que interessa conhecer, de modo a poder aferir a ampla gama de aplicações para as quais sejam adequadas. Só dessa forma se poderá demonstrar se são adequadas para aplicação, quer na reabilitação de rebocos de edifícios históricos, quer na reabilitação de rebocos mais recentes.

3 PROCEDIMENTOS ADOTADOS NA CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 Introdução à campanha experimental desenvolvida

A campanha experimental desenvolvida neste trabalho constou da realização de provetes de argamassa como base em cal hidráulica natural ao traço volumétrico 1:3. A massa de ligante correspondente ao traço volumétrico definido era mantida ou parcialmente substituída por 10% ou 20%, em massa, de um metacaulino.

Os provetes de argamassa, até atingirem a idade de ensaio, 28, 90 e 180 dias, foram sujeitos a três diferentes condições de cura.

A campanha experimental levada a cabo foi essencialmente definida no âmbito dos projetos *FCTMETACAL* e *LIMECONTECH* e compreendeu caracterização mecânica, física, química e microestrutural.

3.2 Matérias-primas

Para realizar as argamassas de traço volumétrico 1:3 utilizaram-se como ligante uma cal hidráulica natural, como pozolana um metacaulino e como agregado, uma mistura definida de areias siliciosas.

3.2.1 Cal hidráulica natural

A cal utilizada para a produção das argamassas estudadas neste trabalho foi uma cal hidráulica natural produzida pela SECIL Martingança, na fábrica da Maceira, designada segundo a norma de produto respetiva [IPQ, 2011] como EN 459-1 NHL3.5 (doravante designada por NHL) (Figura 3.1a). O lote de cal utilizado foi disponibilizado pelo produtor e entregue à Professora Paulina Faria, orientadora deste trabalho, na FCT UNL, em Janeiro de 2012, tendo sido referido resultar de um 1º lote comercializado. A cal foi utilizada para este trabalho praticamente de seguida. Durante a realização das amassaduras foi sempre tido o cuidado de manter o saco da cal bem fechado, sem contaminações por outros materiais nem contacto com a humidade envolvente. Informação sobre a sua composição química pode ser consultada no capítulo 4 (Figura 4.30 subcapítulo 4.2.10). A ficha técnica da cal pode ser consultada no anexo I.

3.2.2 Metacaulino

A pozolana artificial utilizada para substituir em parte a quantidade de cal nas argamassas para produção dos provetes foi um metacaulino comercial francês (em virtude de, no âmbito do projeto *FCTMETACAL* se considerar não existir, à data, nenhum metacaulino produzido em Portugal com

composição perfeitamente estabilizada e que permitisse utilizações repetitivas com lotes distintos) – no caso o Argical M 1200 S da IMERYYS (que se passa a designar por Mk) (Figura 3.1b). O saco de metacaulino utilizado foi disponibilizado ao LNEC diretamente pelo produtor, mantido em condições de correto acondicionamento e disponibilizado à FCT UNL pelo Doutor António Santos Silva, coorientador deste trabalho.

De referir também o cuidado de manter sempre o saco de metacaulino bem fechado, protegido de qualquer humidade da envolvente e contaminação com outros materiais. No capítulo 4 (Figura 4.31 subcapítulo 4.2.10) encontra-se a análise XRD com informações sobre os componentes mineralógicos que constituem o metacaulino. A ficha técnica de metacaulino pode ser consultada no anexo II.

3.2.3 Agregado

O agregado usado na preparação das argamassas foi uma mistura de areias siliciosas lavadas e graduadas, com granulometrias diferentes, numa mistura previamente definida para utilização repetida no âmbito dos projetos *FCTMETACAL* e *LIMECONTECH*. A mistura utilizou o traço volumétrico de 1:1,5:1,5 de APAS12 (areia de granulometria mais grossa), APAS20 (areia de granulometria intermédia) e APAS30 (areia de granulometria mais fina) (Figura 3.1c). As areias foram adquiridas no areeiro que as comercializa e utilizadas no estado seco. No capítulo 4 (Figura 4.32, subcapítulo 4.2.10) encontra-se a análise XRD com informações sobre os componentes mineralógicos constituintes da areia.



Figura 3.1 – Materiais usados para a preparação das argamassas

3.3 Caraterização das matérias-primas

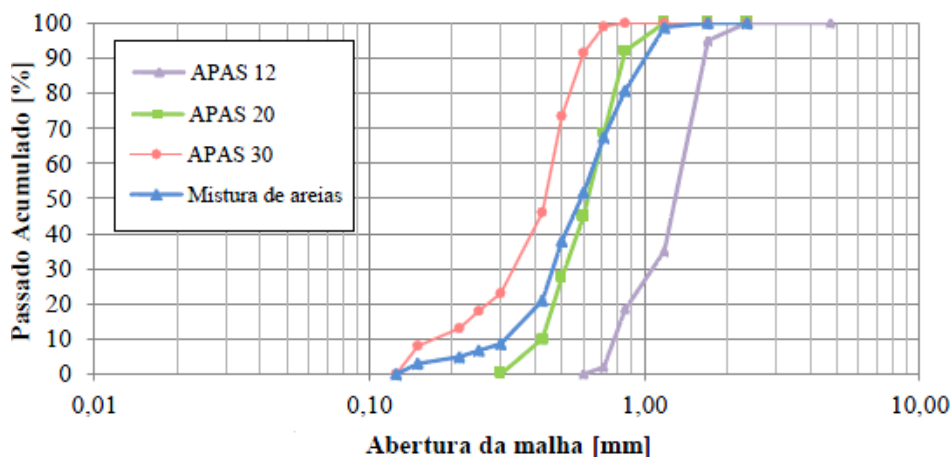
3.3.1 Análise granulométrica das areias

A determinação da granulometria das areias baseou-se na norma NP EN 933-1:2000 [IPQ, 2000]; o ensaio foi realizado no LNEC no âmbito dos projetos *FCTMETACAL* e *LIMECONTECH* em curso. Foi realizado através do processo de peneiração utilizando uma série de peneiros de granulometria conhecida (Quadro 3.1) e um agitador mecânico de peneiros.

Quadro 3.1 – Série de peneiros utilizados para a análise granulométrica (adaptado de Massena, 2011)

Abertura da malha [mm]		
APAS 12	APAS 20	APAS 30 e Mistura de areias
4,75	4,75	4,75
2,36	2,36	2,36
1,7	1,7	1,7
1,18	1,18	1,18
0,85	0,85	0,85
0,71	0,71	0,71
0,6	0,6	0,6
	0,5	0,5
	0,425	0,425
		0,3
		0,25
		0,212
		0,15

Pode definir-se granulometria de um agregado como a distribuição das percentagens das partículas de determinadas dimensões que compõem o agregado [SOUSA-COUTINHO, 1988a]. Este ensaio realizou-se com o fim de aferir as características relativas à dimensão dos grãos de cada tipo de areia e da mistura de todas elas; permite determinar as curvas granulométricas dos agregados, a sua máxima dimensão (a menor dimensão de malha de um peneiro por onde passa uma quantidade de material igual ou superior a 90%), a mínima dimensão (a maior dimensão de malha de um peneiro por onde passa uma quantidade de material igual ou inferior a 5%) e o módulo de finura, que é obtido através da soma das percentagens totais retidas em cada peneiro da série, com exceção do peneiro de malha 0,075 mm, dividida por 100.

**Figura 3.2** – Curvas granulométricas de cada areia e da mistura de areias

Fazendo um acumulado da massa dos agregados retidos em cada peneiro é possível obter a curva granulométrica de cada agregado (Figura 3.2) numa percentagem de massa de material acumulado passado em função de cada peneiro por onde o material passou.

3.3.2 Baridade

A determinação da baridade de todos os constituintes secos das argamassas efetuou-se com base na norma NP EN 1097-3:2002 [IPQ, 2002b] que se fundamenta na determinação da massa do material seco que preenche um recipiente de capacidade conhecida. O resultado do ensaio é necessário para traduzir o traço volumétrico de uma argamassa num traço ponderal, o que permite reproduzir exatamente as dosagens dos materiais a usar no laboratório.

Primeiramente determina-se o volume do recipiente, com massa m_0 , que se utiliza para a realização do ensaio; enche-se este com água, a temperatura conhecida, t_a e seguidamente tapa-se com uma placa de acrílico, com massa m_1 , com o cuidado de garantir que na superfície da água em contato com o acrílico não existam quaisquer bolhas de ar, pesando-se no fim o conjunto, m_2 . O volume do recipiente obtém-se então por:

$$V = \frac{[m_2 - (m_1 + m_0)]}{\rho}$$

(equação 3.1)

Onde,

V [cm^3]: volume do recipiente

m_0 [g]: massa do recipiente

m_1 [g]: massa da placa de acrílico

m_2 [g]: massa do recipiente cheio de água tapado com a placa de acrílico

ρ [g/cm^3]: massa volúmica da água a temperatura t_a obtida do Quadro 3.2

Quadro 3.2 – Massa volúmica da água em função da temperatura

Temperatura da água, t_a [$^{\circ}\text{C}$]	ρ [g/cm^3]
10	0,9997
15	0,9991
23	0,9976

Conhecido o volume do recipiente coloca-se este de modo a que o bordo inferior do funil de sólidos fique a 73 mm do seu topo. Preenche-se o recipiente com o material a ensaiar de modo a que se forme um cone no topo e rasa-se o excesso de material com uma régua metálica, com o cuidado de não se compactar o material no recipiente. Pesa-se o conjunto, m_3 e a baridade obtém-se por:

$$Ba = \frac{(m_3 - m_0)}{V}$$

(equação 3.2)

Onde,

Ba [g/cm³]: baridade

m₀ [g]: massa do recipiente

m₃ [g]: massa do recipiente cheio com o material

V [cm³]: volume do recipiente

Para as pesagens dos materiais utilizou-se uma balança de precisão 0,0001g. Para cada material foram realizadas três medições de baridade, sendo a baridade final a média dos três valores. Os valores de baridade dos materiais utilizados neste trabalho apresentam-se no Quadro 3.3. Verificase que a baridade da mistura de areias é superior à de cada areia devido a um arranjo mais compacto entre as partículas de diferentes dimensões.

Quadro 3.3 – Valores de baridades dos constituintes das argamassas.

Baridade constituintes (g/cm³)	
Cal hidráulica Natural NHL3.5	0,846
Metacaulino Mk	0,294
Areia APAS 12	1,412
Areia APAS 20	1,405
Areia APAS 30	1,388
Mistura areias	1,463

3.4 Produção das argamassas

Para o desenvolvimento experimental foram produzidas, nos laboratórios de Construção do DEC-FCT/UNL, três diferentes argamassas com um traço volumétrico de 1:3 de cal hidráulica natural NHL3.5, com substituições de cal por metacaulino nas percentagens de massa de 0, 10 e 20%. Este número de argamassas e as percentagens de Mk foram definidos pela orientação do trabalho, em face dos respetivos objetivos e de condicionantes logísticos (nomeadamente pelo número de moldes disponíveis, que não permitiu a realização de argamassas com 5% de Mk, tal como estava previsto inicialmente). Na definição das percentagens de Mk utilizadas foram tidos em consideração os resultados de outros trabalhos que têm vindo a ser realizados no âmbito dos projetos onde este se insere, e a percentagem mínima de 25% de hidróxido de cálcio que a NHL3.5 deve possuir. A quantidade de água utilizada para as amassaduras foi igual em todas elas, baseando-se essa quantidade num trabalho anterior em que foram realizadas e caracterizadas argamassas com NHL5, de acordo com procedimentos de ensaio no âmbito do projeto *FCTMETACAL* [FARIA, 2011; CARNEIRO,

2012]. Para uma melhor identificação das argamassas e das variáveis analisadas ao longo do trabalho foram usadas designações próprias que sintetizam a sua diferente composição, em termos de percentagem de Mk existente. No Quadro 3.4 apresenta-se a designação das três diferentes composições realizadas, com indicação da percentagem mássica de cal substituída por Mk, das massas de cada constituinte seco utilizado e do correspondente volume de água de amassadura adicionado.

Quadro 3.4 – Quadro síntese da composição das argamassas

Argamassa	Substituição de massa de NHL por Mk [%]	Massa [g]					Volume de água [ml]
		Ar 12	Ar 20	Ar 30	Mk	NHL	
NHL	0	1129,6	1686	1665,6	0,0	902,5	950
NHL_10Mk	10	1129,6	1686	1665,6	90,3	812,3	950
NHL_20Mk	20	1129,6	1686	1665,6	180,5	722,0	950

3.4.1 Amassaduras

Começaram-se por pesar as areias, o metacaulino e a cal de acordo com as quantidades previamente definidas para as argamassas em estudo, numa balança de precisão 0,0001g (Figura 3.3a).

Em seguida homogeneizaram-se manualmente os materiais secos (areias e ligantes) ainda no tabuleiro com auxílio de uma pá (Figura 3.3b) e colocou-se a mistura na cuba da misturadora mecânica, evitando desperdícios e levantamento de poeiras (Figura 3.3c). Mediu-se a quantidade de água necessária à preparação da argamassa numa proveta graduada.

Os passos seguintes não seguiram exatamente a norma EN 1015-2:1998/A 1:2006 [CEN, 1998/2006], tendo seguido os procedimentos definidos no âmbito do projeto *FCTMETACAL* [FARIA, 2011]. Ligou-se a misturadora mecânica na velocidade lenta durante 150 segundos, sendo a água introduzida na cuba nos primeiros de 15-30 segundos; com a misturadora parada, raspam-se com a pá os bordos e fundo da cuba, procurando envolver todo o material; colocou-se a misturadora em funcionamento durante mais 30 segundos (Figura 3.3d), findo os quais se deu por finalizado o processo de amassadura (Figura 3.3e).



Figura 3.3 – Sequência de produção das argamassas

3.4.2 Caracterização da argamassa no estado fresco: consistência por espalhamento

Concluída a amassadura e com a argamassa no estado fresco, procurou-se avaliar a influência da água na sua trabalhabilidade, através do ensaio de consistência por espalhamento das argamassas. Essa avaliação foi feita utilizando uma mesa de espalhamento com base na norma EN 1015-3:1999 e não atualizada aos seus aditamentos (A1:2004/A2:2006) [CEN, 1999/2004/2006]. O valor da consistência por espalhamento é uma quantificação da fluidez das argamassas frescas, fornecendo uma informação sobre a deformabilidade dessas argamassas quando submetidas a determinado tipo de tensão [FARIA-RODRIGUES, 2004].

Tendo em conta que este trabalho se insere no projeto *FCTMETACAL*, procuraram-se argamassas que se apresentassem trabalháveis e com espalhamentos da ordem dos 150 ± 10 mm.

Para efetuar o ensaio, humedecem-se todos os utensílios e coloca-se argamassa no cone de espalhamento centrado na mesa, em duas camadas compactadas individualmente com um mínimo de quinze pancadas realizadas com uma vara; em seguida rasa-se a superfície e retira-se o cone. Roda-se a manivela da mesa de modo a provocar quinze pancadas em quinze segundos. A argamassa espalha-se na mesa e é medido o seu diâmetro com auxílio de uma craveira e de uma régua segundo um mínimo de dois eixos perpendiculares marcados na mesa, determinando-se posteriormente a sua média, em mm (Figura 3.4).



Figura 3.4 – Ensaio de consistência por espalhamento

3.5 Execução dos provetes

Findas as amassaduras das argamassas e verificada a sua consistência moldaram-se provetes prismáticos de dimensões 40x40x160 (mm) em moldes metálicos previamente montados e pincelados com um mínimo de óleo descofrante em todas as faces, para facilitar a desmoldagem dos provetes.

A argamassa foi colocada dentro do molde posicionado no compactador mecânico (Figura 3.5a) em duas camadas (Figura 3.5b), sendo cada camada compactada com 20 pancadas. Retirando o molde do compactador mecânico, este foi rasado, nivelando a superfície livre dos provetes (Figura 3.5c). Os provetes foram colocados dentro de sacos de polietileno (Figura 3.5d), durante sete dias. Ao fim dos primeiros dois dias, foram desmoldados (sendo mantidos nos sacos) e findos os sete dias, nove provetes de cada composição de argamassa foram colocados em cada condição de cura definida.



Figura 3.5 – Moldagem, compactação e nivelamento dos provetes e cura inicial dentro de saco de polietileno

Os nove provetes moldados com cada argamassa foram devidamente numerados de modo a facilitar a sua identificação para serem colocados nas específicas condições de cura (Quadro 3.5) e para serem de lá retirados ao atingirem a idade em que iriam ser sujeitos aos ensaios de caracterização, aos 28, 90 e 180 dias de idade. As letras M, H e S referem-se à sigla das condições de cura empregues (ver 3.6). Foram ainda executados alguns provetes suplementares para ser possível proceder à sua caracterização a idade mais avançada, a realizar fora do âmbito deste trabalho, mais concretamente 3 provetes de cada argamassa nas cura M e H.

Quadro 3.5 – Quadro síntese da organização dos provetes

Data a ensaiar	Provetes								
	NHL			NHL_10Mk			NHL_20Mk		
28 dias	GM11	GH21	GS31	GM41	GH51	GS61	GM71	GH81	GS91
	GM12	GH22	GS32	GM42	GH52	GS62	GM72	GH82	GS92
	GM13	GH23	GS33	GM43	GH53	GS63	GM73	GH83	GS93
90 dias	GM14	GH24	GS34	GM44	GH54	GS64	GM74	GH84	GS94
	GM15	GH25	GS35	GM45	GH55	GS65	GM75	GH85	GS95
	GM16	GH26	GS36	GM46	GH56	GS66	GM76	GH86	GS96
180 dias	GM17	GH27	GS37	GM47	GH57	GS67	GM77	GH87	GS97
	GM18	GH28	GS38	GM48	GH58	GS68	GM78	GH88	GS98
	GM19	GH29	GS39	GM49	GH59	GS69	GM79	GH89	GS99

3.6 Condições de cura

A fim de se estudar o comportamento das diversas argamassas em diferentes ambientes de cura, foram escolhidos três ambientes que diferem nas suas condições de temperatura e humidade

relativa. Dois desses ambientes foram realizados em laboratório e o terceiro em exposição natural. Os provetes de cada composição estiveram nessas condições dos 7 dias até à idade de ensaio (28, 90 ou 180 dias de idade).

3.6.1 Cura marítima (Cura M)

Para se avaliar o efeito de condições de exposição natural em ambiente fortemente marítimo, provetes de cada argamassa foram expostos na estação experimental do LNEC (Figura 3.6a) situada no Cabo Raso, Cascais, onde ficaram colocados a cerca de 25 metros do mar (Figura 3.6b) com natural aspersão de água salgada e contacto com nevoeiro salino. À designação destas argamassas acresce a letra M, identificativa da cura com exposição em ambiente marítimo. Como em trabalhos anteriores em que tinham sido colocados provetes em exposição natural [MASSENA, 2011], ocorreram problemas nos provetes devido a condições climáticas extremas que decorreram com as argamassas ainda muito frescas (chuva forte com granizo), e para homogeneização da exposição entre todos os provetes, no procedimento *FCTMETACAL* [FARIA, 2011] definiu-se que os provetes teriam de ser colocados na vertical, sobrelevados ligeiramente na base, com o topo superior protegido e com colocação de prismas com idêntica dimensão aos provetes na periferia exposta ao mar. Para tal foi executado um suporte específico e provetes “falsos” que foram utilizados (Figura 3.6b). Os dados meteorológicos referentes a esta cura podem ser consultados no anexo III.



Figura 3.6 – Estação experimental do LNEC e provetes em exposição junto ao mar

3.6.2 Cura húmida (Cura H)

De forma a avaliar o efeito de condições de humidade elevada ($HR > 95\%$), sujeitaram-se provetes à cura designada de húmida, H (Figura 3.7). Esta foi conseguida colocando os provetes numa câmara de cura húmida do DEC-FCT/UNL, que consiste numa grande cuba cheia de água, sobre a qual existem grelhas que suportam os provetes, cuba essa que foi coberta com filme plástico de polietileno. As condições são mantidas e monitorizadas a $95 \pm 5\%$ de humidade relativa (HR) e

temperatura (T) de $21\pm 2^{\circ}\text{C}$. Os dados referentes aos valores de HR e T podem ser consultados no anexo VI.



Figura 3.7 – Câmara de cura húmida

3.6.3 Cura standard (Cura S)

Para uma cura em condições consideradas de referência os provetes foram dispostos na sala de ambiente controlado do DEC-FCT/UNL (Figura 3.8) onde foram expostos a condições de humidade relativa e temperatura controladas, isto é, $\text{HR}=65\pm 5\%$ e $T=20\pm 3^{\circ}\text{C}$.



Figura 3.8 – Câmara de cura standard

3.7 Ensaios de caracterização das argamassas endurecidas

3.7.1 Organização dos ensaios

Todos os ensaios de caracterização das argamassas endurecidas decorreram após 28, 90 e 180 dias em cada tipo de curas nos laboratórios do DEC-FCT/UNL, à exceção dos ensaios de caracterização química e mineralógica, que decorreram nos laboratórios do Departamento de Materiais do LNEC.

Os ensaios realizados foram os seguintes:

- Módulo de elasticidade dinâmico;
- Resistência à tração por flexão;
- Resistência à compressão;
- Absorção de água por capilaridade;
- Secagem;
- Condutibilidade térmica;
- Porosidade aberta;
- Porosimetria/distribuição dos poros, por intrusão de mercúrio, MIP;
- Resistência aos sulfatos
- Análise por difração de raios X, XRD;
- Análise termogravimétrica, TGA.

O primeiro ensaio a realizar-se a cada idade foi o ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, seguidamente o ensaio de resistência à tração por flexão do qual resultam duas metades de cada provete.

Uma metade foi sujeita ao ensaio de resistência à compressão e desse resultaram três partes consideradas suficientemente íntegras para a realização dos ensaios de porosidade aberta, porosimetria de mercúrio, de difração de raios X e de análise termogravimétrica; a outra metade de cada provete usou-se para um outro conjunto de ensaios: capilaridade, secagem, condutibilidade térmica e resistência aos sulfatos, [FARIA, 2011].

3.7.2 Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico

Os provetes provenientes da cura M e da cura H foram colocados na sala da cura S durante 24 horas antes da realização do ensaio, com o intuito de garantir que os todos os provetes fossem ensaiados em condições de teor em água não demasiado elevadas (pelo equipamento ser muito sensível ao teor de água). Mesmo assim ocorreram alguns problemas que se atribuem ao teor em água de alguns provetes ser demasiadamente alto.

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi realizado com base na norma NP EN 14146:2006 [IPQ, 2006]. O processo de ensaio baseou-se na medição da frequência de ressonância longitudinal do provete a ensaiar, com a utilização de um equipamento adequado para a emissão de vibrações e registo da correspondente frequência de ressonância - equipamento “ZEUS Resonance Meter” (Figura 3.9) ao qual está associado um programa de cálculo.

Nesse programa de cálculo são inseridos os valores da massa e das dimensões do provete.

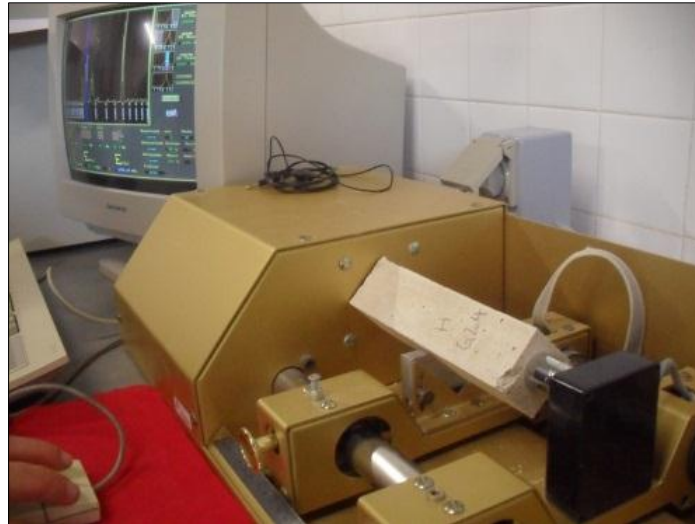


Figura 3.9 – Equipamento “ZEUS Resonance Meter”

Antes do início do ensaio pesou-se o provete numa balança de precisão 0,001g e em seguida colocou-se este corretamente sobre o suporte do equipamento de modo a que um dos topos ficasse em contato com a fonte emissora e o outro topo com o recetor. A fim de obter um maior gama de valores realizaram-se várias leituras por provete, alterando por isso a posição do provete no suporte, através da rotação em torno do eixo longitudinal com amplitude igual a um quarto de rotação [RATO, 2006] e alterando também a face de topo em contato com o emissor de vibrações.

O programa de cálculo determina automaticamente o valor do módulo de elasticidade dinâmico em MPa, através da seguinte fórmula:

$$E_{\text{din}} = (2 \times l \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6}$$

(equação 3.3)

Onde,

E_{din} [MPa]: módulo de elasticidade dinâmico

l [m]: comprimento do provete

f_0 [Hz]: frequência de ressonância longitudinal

ρ [N/m³]: peso volúmico do material

g [9,81(m/s²)]: aceleração da gravidade

3.7.3 Ensaios de resistência à tração por flexão e compressão

Após o ensaio da determinação do módulo de elasticidade dinâmico, que não é destrutivo, os provetes foram sujeitos aos ensaios de resistência à tração e à compressão. Os ensaios foram realizados com base na norma EN 1015-11:1999/A1:2006 [CEN, 2006], sendo a tração imposta por

flexão em três pontos do provete e a compressão sobre uma das metades resultante do ensaio de flexão.

Para implementar a tração utilizou-se uma máquina universal de forças, “ZWICK Z050”, equipada com uma célula de carga de 2 kN e velocidade de aplicação da carga de 0,2 mm/min.

O ensaio de resistência à tração por flexão consiste na aplicação de uma carga pontual a meio vão do comprimento do provete, que se encontra apoiado em dois pontos distanciados de 100mm (Figura 3.10a). A carga é aplicada numa das faces lisas do provete, tal como o apoio que é realizado também numa das faces lisas do provete. O fim do ensaio dá-se quando o provete atinge a rotura (Figura 3.10b), registando-se nesse momento a força máxima de tração a que o provete foi sujeito, F_t .

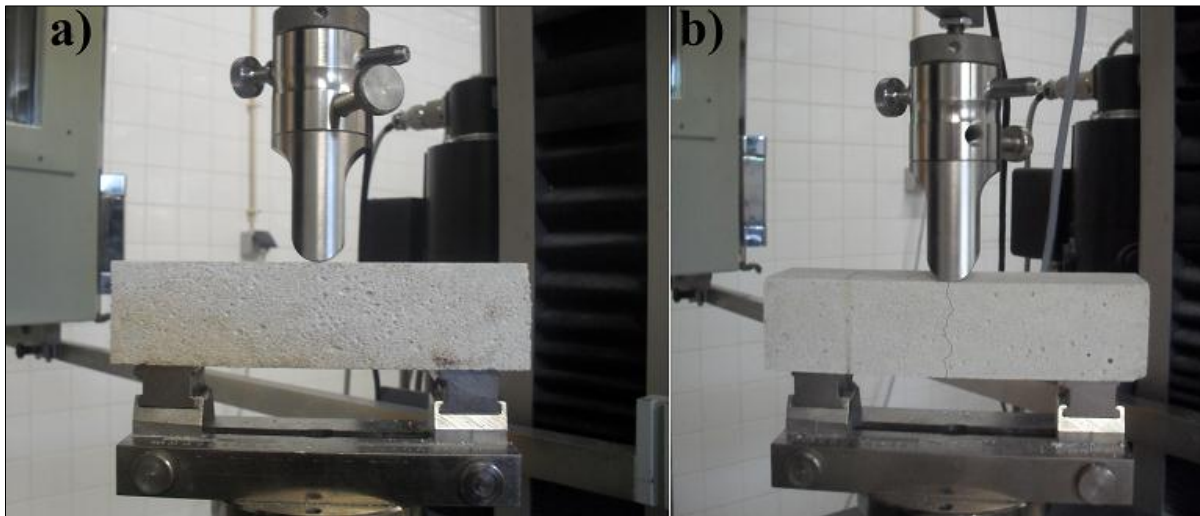


Figura 3.10 – Provete ensaiado à tração por flexão e rotura de tração por flexão

O valor da resistência à tração por flexão pode então calcular-se através da seguinte equação:

$$R_t = 1,5 \times \frac{F_t \times l}{b \times d^2} \times 10^3 \quad (\text{equação 3.4})$$

Onde,

R_t [MPa]: resistência à tração por flexão

F_t [kN]: carga de rotura de tração por flexão

l [mm]: distância entre pontos de apoio

b, d [mm]: dimensão do lado da secção do provete

Realiza-se o ensaio de compressão utilizando-se uma das metades do provete que resultou do ensaio de resistência à tração por flexão.

A compressão é também aplicada com o mesmo equipamento, “ZWICK Z050”, desta feita com uma célula de carga de 50 kN e velocidade de aplicação da carga de 0,7 mm/min.

Para a realização do ensaio de resistência à compressão coloca-se o provete num suporte metálico de forma a garantir o contato total da máquina com o provete; o contato do provete com a máquina efetua-se nas faces lisas do provete (Figura 3.11a).

O fim do ensaio dá-se quando o provete atinge a rotura (Figura 3.11b), registando-se nesse momento a força máxima de compressão a que o provete foi sujeito, F_c . O valor da resistência à compressão pode então calcular-se através da seguinte equação:

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

(equação 3.5)

Onde,

R_c [MPa]: resistência à compressão

F_c [N]: carga de rotura de compressão

A [mm²]: área de aplicação da carga

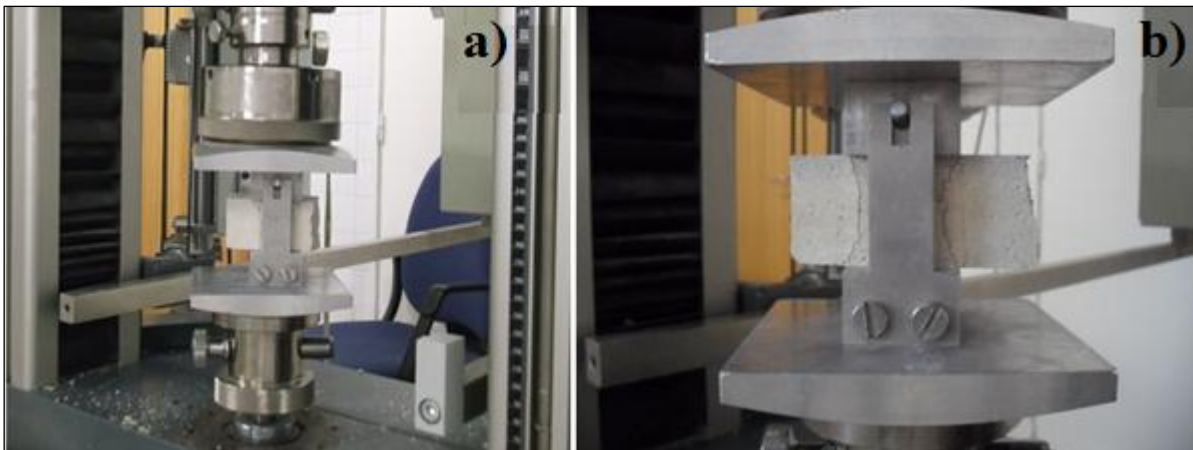


Figura 3.11 – Provete ensaiado à compressão e rotura de compressão

3.7.4 Ensaio de absorção de água por capilaridade

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

Antes de se iniciar o ensaio os provetes ficaram um mínimo de 48 horas na estufa a 60°C, até atingirem uma massa constante (correspondente a uma variação de 0,1% de massa num intervalo de 24 horas).

Arrefeceram até à temperatura ambiente e em seguida foram pesados. Registada a sua massa, envolveu-se cada provete em película aderente de polietileno para impermeabilizar as faces laterais (Figura 3.12a); aos 28 e 90 dias colocou-se também uma gaze, presa com elástico, na base dos

provetes, com o intuito de evitar perdas de massa quando estes fossem imersos em água (Figura 3.12b); esta gaze veio a demonstrar-se desnecessária e não foi utilizada aos 180 dias (Figura 3.12c).

Preparou-se uma caixa estanque onde se criaram condições de ambiente saturado; colocou-se nesta caixa um tabuleiro com uma rede plástica na base, perfeitamente nivelado, e introduziu-se água de modo a criar uma lâmina de água de 5mm acima da rede.

Pesou-se novamente cada provete, instante t_0 , e introduziram-se ordenadamente dentro do tabuleiro na caixa, com a base em contacto com a lâmina de 5mm de água. Foram efetuadas pesagens aos 5min, 10min, 15min, 30min, e a cada hora das primeiras 9 horas de ensaio, pesando-se depois diariamente (Figura 3.12d). O ensaio terminou quando se registou uma diferença de massa inferior a 1% no intervalo de 24 horas. Entre cada pesagem foi tido o cuidado de garantir a lâmina de água de 5mm no tabuleiro assim com o fecho da tampa da caixa, mantendo assim o ambiente saturado.

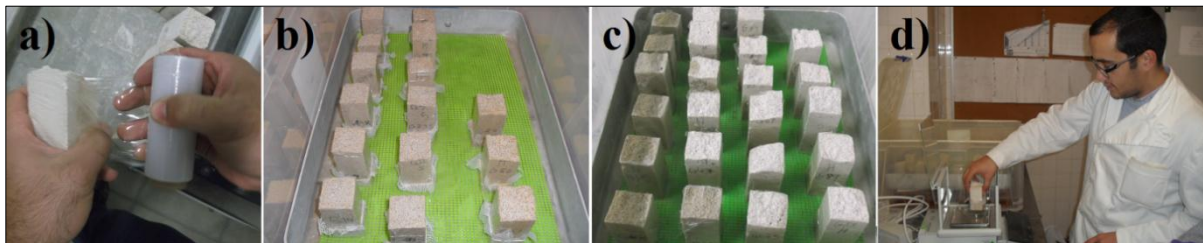


Figura 3.12 – Provete envolto na película, provetes com gaze e sem gaze e pesagem dos provetes

As pesagens foram efetuadas retirando-se o provete da caixa, sacudindo-o de modo a que este deixasse pingar o excesso de água, colocando-o de seguida na balança, de precisão 0,001g, e registando a sua massa no instante t_i , voltando o provete para a caixa.

Findo o ensaio construiu-se a curva de absorção capilar de cada provete e, pela média dos provetes idênticos, de cada argamassa e condição de cura, a curva correspondente a cada argamassa/condição de cura (Figura 3.13). Estas curvas apresentam, em abcissas, a raiz do tempo (em raiz de minutos) e, em ordenada, a massa da quantidade de água absorvida que se obteve por área da base dos provetes, tendo em conta a seguinte equação:

$$m = \frac{m_i - m_0}{A} \quad (\text{equação 3.6})$$

Onde,

m [kg/m^2]: massa da quantidade de água absorvida

m_i [kg]: massa do provete ao fim do tempo t_i

m_0 [kg]: massa do provete seco no do tempo t_0

A [m^2]: área da seção do provete em contato com a água (0,04x0,04m)

Com os valores de massa de água absorvida os provetes são agrupados em argamassas/curas sendo os valores de cada lote obtidos para pela média dos três provetes. O valor assintótico (VA) da curva de absorção define o total de água que a argamassa/cura absorve por capilaridade (função do volume médio de metade do provete original moldado) e o declive do trecho reto inicial da curva (passando ou não pela origem) define o coeficiente de capilaridade (CC) dessa argamassa/cura.

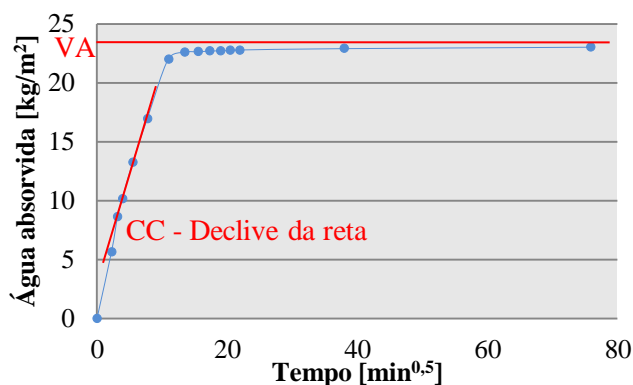


Figura 3.13 – Curva de absorção de água, cálculo do valor assintótico e coeficiente de capilaridade

3.7.5 Ensaio de secagem

Terminado o ensaio de absorção de água por capilaridade (com os provetes completamente saturados em água absorvida) deu-se início ao ensaio de secagem, com base na especificação da RILEM [RILEM TC 25-PEM, 1980] e tratando os resultados de acordo com o especificado por Brito [2011].

O ensaio decorreu em cima de uma bancada perfeitamente impermeável e lisa na sala da cura S (Figura 3.14). Para este ensaio retiraram-se aos provetes os elásticos e as gazes e pesou-se cada provete.



Figura 3.14 – Ensaio de secagem

Efetuaram-se pesagens, numa balança de precisão 0,001g, em cada hora durante as primeiras 4 horas da secagem, às últimas horas úteis do primeiro dia de ensaio e a partir daí, diariamente até às 480 horas de ensaio, altura em que o teor de humidade de todos os provetes se encontrava em equilíbrio com o ambiente, a 65% de HR, de forma a permitir uma comparação de resultados.

Com os dados obtidos obtêm-se o teor em água dos provetes, que foi calculado através da equação 3.5 e que possibilita traçar a curva de secagem com o teor em água ou a massa de água em função da área de secagem (em ordenadas), função do tempo de ensaio (em abcissas):

$$w_t = \frac{m_i - m_0}{m_i}$$

(equação 3.7)

Onde,

w_t [%]: teor em água

m_i [g]: massa do provete no instante t_i

m_0 [g]: massa do provete seco

Para determinação do índice de secagem utilizou-se uma equação trabalhada por Brito [2009] com base numa norma italiana não consultada diretamente, aproximando o cálculo do integral à soma sucessiva de trapézios:

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

(equação 3.8)

Onde,

IS [-]: índice de secagem

t_i [h]: instante de ensaio i

t_f [h]: tempo final de ensaio

w_{t_i} [%]: teor em água do provete no instante t_i

$Q_{\text{máx}}$ [%]: teor em água máximo do provete (instante inicial do ensaio)

A taxa de secagem (TS) foi obtida através do declive com a horizontal do troço reto inicial da curva de secagem com o teor em água em função do tempo (Figura 3.15);

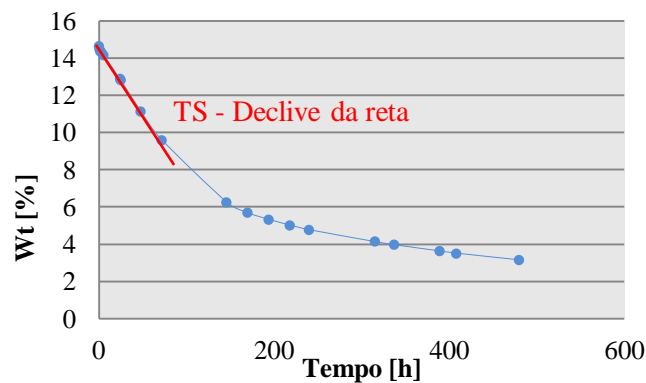


Figura 3.15 – Curva de secagem com o teor em água em função do tempo

Foi também calculado o que se designou por coeficiente de secagem (CS), obtido através do declive com a horizontal do troço reto intermédio da curva de secagem com a diferença da abcissa ser em função da raiz tempo (Figura 3.16). No entanto este valor mostrou-se menos interessante que a TS e como tal não vai constar dos resultados.

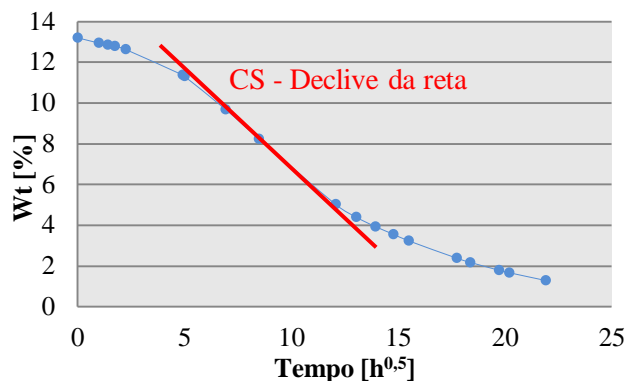


Figura 3.16 – Curva de secagem com o teor em água em função da raiz tempo

3.7.6 Ensaio de condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica é uma característica que traduz a forma como um material se deixa atravessar pelo calor [HENRIQUES, 2007].

O ensaio de caracterização da condutibilidade térmica realizou-se de acordo com as especificações do aparelho “ISOMET Model 2104”, tendo sempre em conta que o sensor do aparelho é indicado para efetuar leituras em superfícies com que este fique em total contato, o que não é o caso deste trabalho, uma vez que as faces dos provetes não têm área suficiente. No entanto decidiu-se efetuar este ensaio para, em termos comparativos, ter uma ideia de como poderão ser influenciados os valores de condutibilidade térmica nas diferentes argamassas pelas diferentes percentagens de substituição de metacaulino, curas e a sua eventual evolução coma idade, e especialmente em termos comparativos com outras argamassas realizadas com base noutros ligantes e analisadas através de provetes da mesma dimensão e com o mesmo equipamento; os valores lidos são usados meramente para comparação direta não sendo por isso considerados para já como característicos das argamassas, por exemplo numa aplicação em reboco.

Neste ensaio utilizaram-se os provetes que tinham sido utilizados para determinação da capilaridade e da secagem, sem a película de polietileno e em equilíbrio com o ambiente de 65% de HR. Colocou-se o provete em cima de uma placa de poliestireno extrudido, de modo a que a bancada onde o ensaio se realizou não influenciasse as leituras, ligando-se depois o aparelho. Colocou-se o sensor sobre uma face lisa do provete realizando-se uma leitura (Figura 3.17); em seguida colocou-se o sensor sobre outra face e realizou-se uma segunda leitura; a terceira leitura só se efetuou nos casos em que a diferença entre as duas primeiras leituras fosse superior a 5%.



Figura 3.17 – Realização do ensaio de determinação aproximada da condutibilidade térmica

3.7.7 Ensaio de porosidade aberta

Este ensaio realizou-se com base na norma para ensaio de pedra natural NP EN 1936 [IPQ, 2008] adaptando-a para os provetes em estudo.

Antes de começar o ensaio os pequenos provetes (volume de cerca de 40x40x15-20 (mm)) resultantes do topo liso da metade que tinha sido submetida ao ensaio de compressão ficaram mais 24 horas na estufa a uma temperatura de 60°C para que estivessem em massa constante. Retirados da estufa deixaram-se arrefecer sem absorverem humidade e em seguida procedeu-se à sua pesagem numa balança de precisão 0,001g.

Em seguida os provetes foram colocados dentro de um exsiccador completamente selado e foram sujeitos à atuação de uma bomba de vácuo durante 24 horas para retirar todo o ar dentro do exsiccador e dos provetes (Figura 3.18a) até ser atingida a pressão de 20Torr (sensivelmente 0,0267bar). Passadas 24 horas abriu-se a torneira que permitiu a entrada de água no exsiccador (Figura 3.18b), ficando os provetes imersos ao fim de um mínimo de 15 minutos, ficando assim sujeitos ao vácuo mas agora imersos em água. Desta forma pretendeu-se que os poros dos provetes que anteriormente eram preenchidos por ar ficassem preenchidos por água. Passadas 48 horas desligou-se a bomba e abriram-se as entradas do exsiccador que no início estavam seladas, ficando os provetes apenas imersos em água (Figura 3.18c), à pressão ambiente.

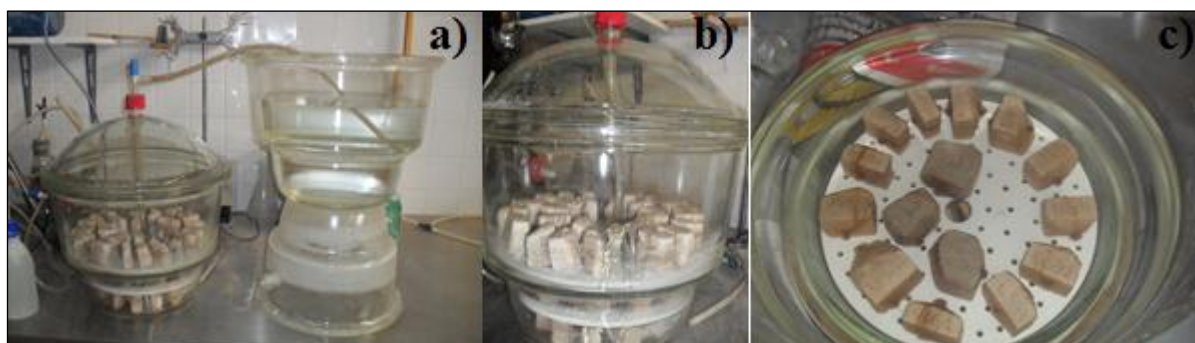


Figura 3.18 – Ensaio de porosidade aberta, método hidrostático

Findas as 72 horas os provetes foram retirados da água e pesados. Foram efetuadas duas pesagens: uma pesagem hidrostática com o auxílio de um cesto pendurado na parte inferior da balança e mergulhado dentro de água, de modo a permitir que, quando se realizasse a pesagem, o provete estivesse totalmente imerso em água (Figura 3.19a); seguiu-se a pesagem saturada (Figura 3.19b), que foi efetuada após deixar escorrer o excesso superficial de água.

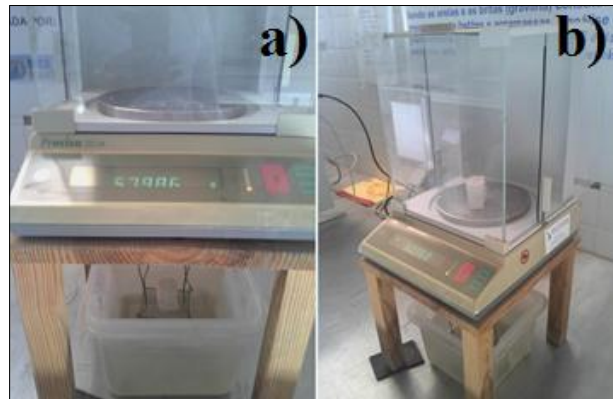


Figura 3.19 – Pesagem hidrostática e pesagem saturada

Com os valores obtidos é possível calcular o valor da porosidade aberta (P_{ab}) através da equação:

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

(equação 3.9)

Onde,

P_{ab} [%]: porosidade aberta

m_1 [g]: massa da amostra seca

m_2 [g]: massa hidrostática da amostra

m_3 [g]: massa saturada da amostra

É possível calcular também o valor da massa volúmica aparente (MVA) através da equação:

$$MVA = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 10^3$$

(equação 3.10)

Onde,

MVA [kg/m^3]: massa volúmica aparente

m_1 [g]: massa da amostra seca

m_2 [g]: massa hidrostática da amostra

m_3 [g]: massa saturada da amostra

3.7.8 Ensaio de resistência aos sulfatos

O ensaio de resistência aos sulfatos foi realizado com base na norma NP EN 12370:2001, [IPQ, 2002], desenvolvida para o ensaio de resistência à cristalização de sais para pedras naturais e ao especificado por Faria [FARIA-RODRIGUES, 2009].

Primeiramente os provetes foram secos na estufa a 105°C durante 24 horas a fim de atingirem massa constante. Foi preparada uma solução não saturada de sulfato de sódio anidro a 3,09% obtida através da adição de 32,9 g de sulfato de sódio (Na_2SO_4) por litro de água a 20-25 °C, solução essa que foi a mesma utilizada ao longo de todos os ciclos de ensaio.

De seguida deu-se início aos ciclos de ensaio. Cada ciclo de ensaio é composto pelo arrefecimento dos provetes (Figura 3.20b), pela pesagem dos provetes numa balança de precisão 0,001g (Figura 3.20a) e registo das suas massas, seguido da sua imersão na solução de sulfato de sódio (Figura 3.20c) com um espaçamento mínimo de 2 cm entre os provetes e os bordos da caixa e de 8mm de altura de água acima dos provetes durante 2 horas. Após as 2 horas os provetes são retirados do banho e colocados na estufa a 105°C (Figura 3.20d) durante 21 ± 2 horas. Este processo (ciclo de imersão, secagem e pesagem) repetiu-se por vinte ciclos ou até que o provete se desintegrasse.



Figura 3.20 – Ciclos do ensaio de resistência aos sulfatos

Os ensaios decorreram diariamente exceto aos fins de semana, períodos nos quais os provetes permaneceram na estufa à temperatura de 105°C.

3.7.9 Ensaio de porosimetria de mercúrio

Para uma melhor compreensão da estrutura porosa das argamassas recorreu-se à análise de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP), a provetes de cada argamassa/cura secos e ensacados imediatamente após a realização do ensaio de resistência à compressão.

A técnica de análise MIP é uma técnica poderosa que é bastante útil para a exploração da estrutura de poros maiores que 10 nm, incluindo poros de tamanho entre 0,01 e 100 μm envolvidos nos processos de carbonatação das argamassas de cal [LAWRENCE, 2007].

Na análise MIP, o volume de metal líquido, que penetra a amostra é medido em função da pressão aplicada; o volume de mercúrio necessário para encher todos os poros acessíveis é considerado o volume total de poros [STEFANIDOU, 2010]. O tratamento posterior baseia-se na lei

capilar que regula a penetração dum líquido em pequenos poros. Apesar de os poros na sua maioria não apresentarem um forma cilíndrica, e o raio registado ser o raio de entrada do mercúrio no poro, a equação de Washburn é geralmente admitida como um método prático de analisar o que naturalmente são os sistemas muito complexos de poros das amostras, sendo em geral, os dados analisados por meio dessa equação [LAWRENCE, 2007; RATO, 2006]:

$$P = \frac{4\gamma \cos \Phi}{D}$$

(equação 3.11)

Onde,

P [Pa]: pressão

γ [N/m]: tensão de superfície do mercúrio

Φ [°]: ângulo de contato do mercúrio com a amostra

D [m]: diâmetro dos poros

O ensaio de porosimetria de mercúrio realizou-se no porosímetro “Autopore IV 955” (Figura 3.21), equipamento que dispõe de duas portas de baixa pressão e uma porta de alta pressão, o qual está associado a um software de cálculo e registo de dados.



Figura 3.21 – Porosímetro “Autopore IV 955”

Antes de se iniciar o ensaio é necessária a preparação-de pequenas amostras cilíndricas dos provetes e com tamanho suficiente para entrarem no penetrómetro, que se colocam na estufa a 48°C para atingirem massa constante, após o que são colocadas num exsiccador com sílica-gel para que a sua temperatura estabilize enquanto permanecem secas. Depois de pesadas introduzem-se na cápsula do penetrómetro de ensaio colocando-se no bordo desta uma pequena quantidade de óleo de selagem e sendo de seguida a cápsula fechada (Figura 3.22a); determina-se de seguida a massa do conjunto (penetrómetro e amostra). O ensaio é iniciado no módulo de baixa pressão. Colocado o penetrómetro na porta respetiva (Figura 3.22b), a pressão no interior do sistema de ensaio é reduzida até ao valor de

100 μmHg ; seguidamente introduz-se mercúrio preenchendo na totalidade a zona circundante da amostra e a haste do penetrómetro (Figura 3.22c). Dá-se então início ao processo de intrusão subindo a pressão em 15 patamares pré-definidos. Terminada a fase da baixa pressão reduz-se a pressão no interior do sistema até à pressão atmosférica, retira-se o penetrómetro e volta-se a pesar o conjunto.

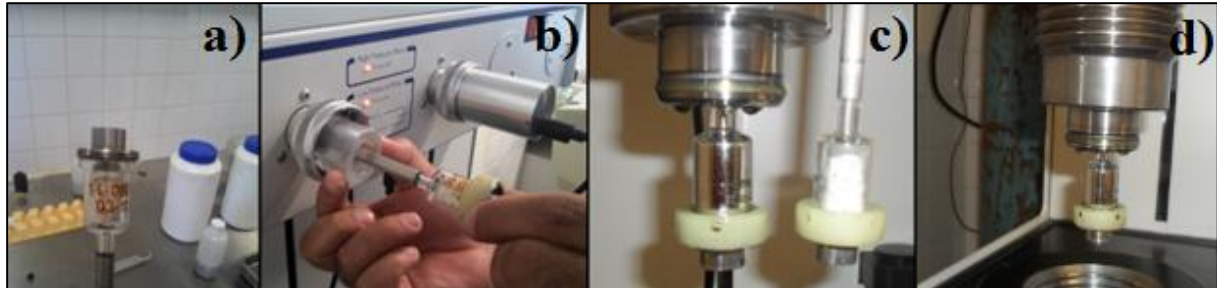


Figura 3.22 – Porosimetria por intrusão de mercúrio, MIP

Inicia-se então o processo da alta pressão colocando o penetrómetro na porta correspondente (Figura 3.22d), passando por 67 patamares de intrusão de pressão de intrusão e 27 patamares de extrusão (Quadro 3.6); terminado o processo o computador regista o volume de mercúrio introduzido. No final o software informático efetua os cálculos necessários relativos à introdução incremental e cumulativa de mercúrio e às determinações de porosidade aberta, P_{ab} , e massa volúmica aparente, MVA, [RATO, 2006; STEFANIDOU, 2010].

Quadro 3.6 – Patamares de pressão pré-definidos no ensaio de porosimetria de mercúrio

Baixa pressão [MPa]	Alta pressão - intrusão [MPa]				Alta pressão - extrusão [MPa]	
0,0138	0,2758	2,5855	10,3421	44,8159	188,2269	2,084
0,0207	0,3447	2,7579	12,0658	48,2633	144,7899	1,6547
0,0276	0,4137	2,9303	13,7895	51,7107	110,3161	1,31
0,0345	0,4826	3,1026	15,5132	55,1581	85,495	0,9997
0,0414	0,5516	3,275	17,2369	58,6054	66,1897	0,7584
0,0483	0,6205	3,4474	18,9606	62,0528	50,3317	0,5861
0,0552	0,6895	3,7921	20,6843	65,5002	39,001	0,4482
0,0621	0,8618	4,1369	22,408	68,9476	29,6475	0,3447
0,0689	1,0342	4,4816	24,1316	86,1845	22,7527	0,2068
0,0862	1,2066	4,8263	25,8553	103,4214	17,9264	0,1034
0,1034	1,379	5,1711	27,579	120,6582	13,7895	
0,1207	1,5513	5,5158	29,3027	137,8951	10,3421	
0,1379	1,7237	5,8602	31,0264	155,132	8,2737	
0,1724	1,8961	6,2053	32,7501	172,3689	6,2053	
0,2068	2,0684	6,55	34,4738	189,6058	4,8263	
	2,2408	6,8948	37,9212	206,8427	3,4474	
	2,4132	8,6184	41,3685		2,7579	

3.7.10 Ensaios de difração de raios X e de análise termogravimétrica

Os ensaios de difração de raios X (XRD) e de análise termogravimétrica (TGA) foram realizados no LNEC, com o apoio do Eng. André Gameiro, bolsheiro do projeto *FCTMETACAL*, tendo sido todas as amostras a analisar preparadas pelo autor do presente trabalho e os ensaios acompanhados quase na sua totalidade. Os resultados provenientes destes ensaios foram usados para possibilitarem uma melhor interpretação dos valores obtidos nos ensaios realizados na FCT UNL. Foram caracterizados os nove lotes das diferentes argamassas (três composições de argamassas e três condições de cura) nas diferentes idades.

3.7.10.1 Preparação das amostras e procedimento de ensaio

Os provetes de cada lote, logo após o ensaio de resistência à compressão, foram secos em estufa e ensacados, procurando eliminar tanto o contacto com a humidade, como com o dióxido de carbono. Depois de transportados para o LNEC, foram colocados novamente em estufa a 40°C durante 24 horas até ao início da preparação das amostras. Após a secagem retiraram-se amostras de cada provete para serem preparadas para as análises de XRD e TGA.

3.7.10.2 Análise por difração de raios X (XRD)

A XRD é uma técnica que fornece informações vastas, claras e pormenorizadas quanto à qualificação, caracterização e quantificação dos minerais presentes numa amostra sólida em análise. Para além desses factos, a XRD é uma técnica de análise muito versátil e rápida de executar. O único obstáculo da XRD é esta não poder ser aplicada fidedignamente a minerais não cristalinos.

A base da análise por XRD fundamenta-se na evidência de os planos cristalográficos de um composto irradiado por um feixe monocromático de raios-X, com comprimento de onda λ , refletirem a radiação quando é cumprida a Lei de Bragg [CARNEIRO, 2012; CHATTERJEE, 2000]:

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

(equação 3.10)

Onde,

d [nm]: distância entre planos reticulares (específica de cada substância)

θ [°]: ângulo de incidência do feixe de raios-X

n [-]: número inteiro

λ [Å]: comprimento de onda do raio-X

A Figura 3.23 mostra um feixe de raios X, com comprimento de onda λ , incidindo com um ângulo θ num conjunto de planos cristalinos com espaçamento d .

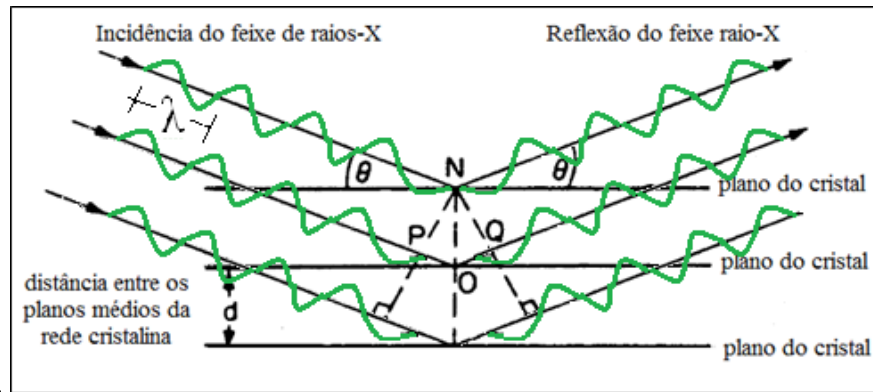


Figura 3.23 – Difração de raios-X por uma amostra cristalina (adaptado de PADILHA, 2000)

A análise por XRD teve como objetivos principais a avaliação do tipo de compostos formados e a sua estabilidade ao longo do tempo, acompanhada pelo estudo das reações de hidratação e de endurecimento das várias argamassas em estudo. Face a este objetivo privilegiou-se a análise da composição da pasta hidratada do ligante. Assim, preparam-se de cada argamassa frações enriquecidas em ligante, que foram designadas por fração fina. Estas foram obtidas a partir da desagregação da argamassa com auxílio de um martelo de borracha (Figura 3.24a) de modo a separar a pasta da areia, sem que os grãos de areia fossem partidos (Figura 3.24b), passando de seguida o material desagregado por um peneiro de 106 μm de abertura, de modo a recolher-se apenas a fração fina.



Figura 3.24 – Preparação da amostra para análise XRD.

Para a obtenção dos dados de XRD utilizou-se o difratómetro “Philips PW3710”, com 35 kV e 45 mA de radiação (Figura 3.25a) utilizando radiação $\text{CoK}\alpha$ com comprimento de onda $\lambda = 1.7903\text{\AA}$ (Figura 3.25b). Os difratogramas foram registados entre 3° e $74^\circ 2\theta$, com incrementos de $0,05^\circ 2\theta$ com 1 segundo por incremento com efeito $0,05^\circ 2\theta\text{s}^{-1}$ [GAMEIRO *et al.*, 2012].

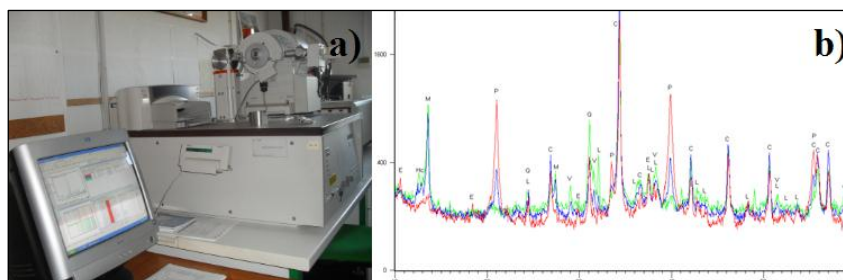


Figura 3.25 – Difratómetro de raio-X “Philips PW3710” e difratograma

A amostra preparada como anteriormente descrito foi colocada num porta-amostras metálico.

O enchimento do porta-amostras é feito por camadas, que são compactadas até que se encha a totalidade do compartimento (Figura 3.26a e 3.26b), após o que é colocado no difratómetro (Figura 3.26c).

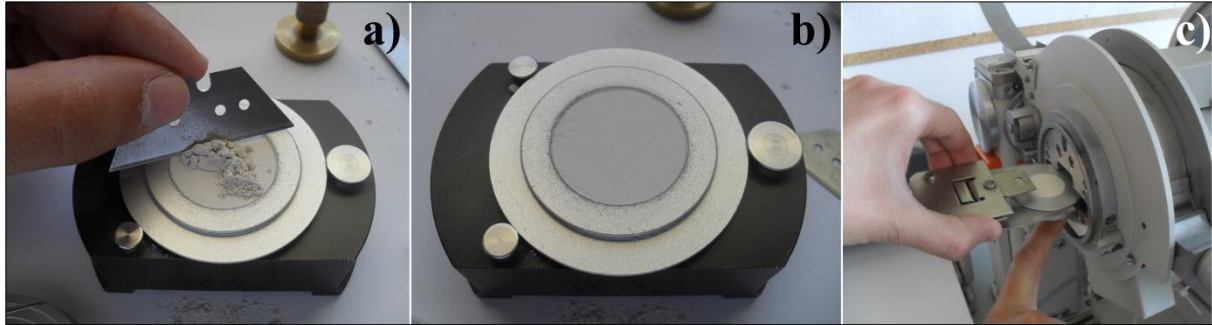


Figura 3.26 – Preparação da amostra para o difratómetro

6

3.7.10.3 Análise termogravimétrica (TGA)

A análise térmica é um termo geral que abrange uma variedade de técnicas térmicas de monitorização das alterações físicas e químicas que ocorrem numa substância em função da variação da temperatura [RAMACHANDRAN, 2002; CIZER, 2009].

A análise termogravimétrica (TGA) é uma das técnicas térmicas que monitoriza as alterações na massa de um material em função do tempo ou da temperatura, ao mesmo tempo que é sujeita a um programa de aquecimento ou arrefecimento com velocidade controlada. Uma vez que os ligantes hidráulicos (e ligantes aéreos e pozolânicos) sofrem alterações físico-químicas mediante o aquecimento, faz com que a TGA seja uma técnica muito útil para estudar as reações de hidratação, carbonatação e pozolânica [CIZER, 2009; MOROPOULOU *et al.*, 2004; CARNEIRO 2012].

Tendo em conta que as reações que levam a uma perda de massa (desidratação, descarbonatação) ou ganho de massa (hidratação, carbonatação) podem ser quantificadas, muitos dos ganhos ou perdas de massa permitem identificar compostos nas amostras uma vez que estes possuem intervalos de temperatura característicos. Outra forma de identificá-los é através das leituras de curvas térmicas onde na abcissa se encontra a derivada da termogravimetria (dTG). Uma vez que essas curvas fornecem picos relacionados com as fases de hidratação e de carbonatação nas suas gamas de temperatura de decomposição características é possível identificar e monitorizar o progresso qualitativo da sua formação [CIZER, 2009].

A análise TGA foi realizada sobre uma amostra correspondente à global. A amostra para TGA foi moída, com auxílio de um pilão e almofariz cerâmicos (Figura 3.27a), de modo a que a sua totalidade (ligante e agregados) passasse pelo peneiro de malha 106 μm (Figura 3.27b).



Figura 3.27 – Preparação da amostra para análise de termogravimetria

A análise TGA foi realizada num analisador “SETARAM TGA 92” (Figura 3.28a), numa atmosfera inerte de argón (3l/h), com uma velocidade de aquecimento de 10°C/min, desde a temperatura ambiente até aos 1000°C [SANTOS-SILVA, 2006]. O conteúdo de portlandite livre nas amostras, foi definido pela perda de massa no intervalo de 380 – 550°C, o que corresponde à desidratação da portlandite. Quanto ao teor de calcite, esse foi calculado a partir do teor de CO₂ determinado pela perda de massa no intervalo de 550-850°C, que corresponde à descarbonatação da calcite. Nas curvas TGA, como foi anteriormente referido é também comum apresentar a derivada da curva TGA (dTG) (Figura 3.28b), uma vez que o início e o fim são mais facilmente visíveis [GAMEIRO *et al.*, 2012; CARNEIRO, 2012].

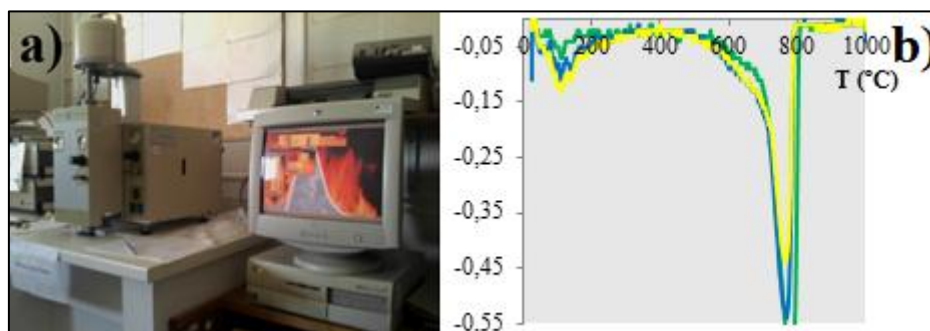


Figura 3.28 – Analisador “SETARAM TG A92” e curva dTG

4 EXPOSIÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

No presente capítulo serão apresentados e analisados caso a caso todos os resultados referentes à campanha experimental. Primeiramente surgem os resultados obtidos na caracterização das argamassas no estado fresco, seguidos pelos resultados obtidos na caracterização das argamassas endurecidas. Os gráficos e as tabelas apresentadas auxiliarão na leitura e análise dos resultados.

4.1 Resultados da caracterização das argamassas no estado fresco

4.1.1 Consistência por espalhamento

No Quadro 4.1 estão apresentados os traços ponderais, a razão de água/NHL e água/ligante e os valores de espalhamentos das argamassas produzidas. Enquanto o traço volumétrico ligante:agregado é de 1:3, o traço ponderal é de 1:5 face às respetivas baridades. No entanto, e embora os traços se mantenham constantes, o teor de metacaulino entre as argamassas varia

Quadro 4.1 – Traços ponderais, relação água/ligante e espalhamentos das argamassas

Argamassa	Traço ponderal			Razão A/NHL	Razão A/(NHL +Mk)	Esp (mm)	
	NHL:Mk:Ar12:Ar20:Ar30	NHL:Mk:S	Lig:S			Méd	DP
NHL	1:0:1,3:1,9:1,8	1:0:5	1:5	1,1	1,1	152	1
NHL_10Mk	1:0,1:1,4:2,1:2,1	1:0,1:5,5	1:5	1,2	1,1	149	2
NHL_20Mk	1:0,25:1,6:2,3:2,3	1:0,25:6,2	1:5	1,3	1,1	143	1

A ter em conta, o facto de em todas as argamassas a quantidade de água adicionada ter sido a mesma, de que decorre uma igual razão água /ligante e uma razão água/NHL crescente. A diferença de valores de espalhamento deve-se assim à inclusão do metacaulino nas argamassas. Os valores obtidos foram mais elevados nas argamassas sem metacaulino e foram diminuindo com a inclusão de teores crescentes de metacaulino, depreendendo-se assim que a inclusão de metacaulino, diminui a consistência das argamassas.

No anexo V (Tabela V.1) podem ser consultados todos os valores de consistência obtidos para cada argamassa.

4.2 Resultados da caracterização das argamassas endurecidas

A caracterização das argamassas no estado endurecido permitiu estudar as alterações das propriedades com a introdução de metacaulino e a sua evolução ao longo do tempo nas diferentes curas. Os valores obtidos para cada argamassa são resultado da média dos valores dos provetes correspondentes em cada ensaio, tendo-se utilizado três provetes da mesma argamassa/cura (e um mínimo de três determinações) para cada ensaio.

Para uma leitura mais fácil dos resultados, criou-se um código de cores que se mantém na apresentação dos resultados de todos os ensaios. As três argamassas em estudo terão uma respetiva escala de cores: argamassa NHL é ilustrada a **verde**, a NHL_10Mk **azul** e a NHL_20Mk, **amarelo**.

4.2.1 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico é um parâmetro que permite avaliar a deformabilidade das argamassas fornecendo uma tendência das suas resistências mecânicas. Em termos de resistências mecânicas, as argamassas mais favoráveis vão depender do tipo e aplicação – no caso de aplicações em rebocos, das resistências mecânicas das respetivas paredes; com efeito as argamassas deverão ser o mais resistentes possível mas de modo a não serem mais resistentes que as paredes onde vão ser aplicadas.

Uma maior deformabilidade das argamassas corresponde a um menor módulo de elasticidade.

O Quadro 4.2 regista os valores médios e desvios padrão do módulo de elasticidade dinâmico, E_{din} , de todas as argamassas as idades de 28, 90 e 180 dias. Na Figura 4.1 pode ser consultada a evolução de todas as argamassas em todas as curas com a idade. A Figura 4.2 apresenta a evolução dos valores de E_{din} em cada cura, tendo como referência a argamassa NHL, às idades de 28, 90 e 180 dias.

No anexo V (Tabela V.2 a V.4) podem ser consultados os valores individuais obtidos nas leituras efetuadas para cada provete de cada argamassa.

Quadro 4.2 – Valores médios e desvios padrão do módulo de elasticidade dinâmico

Argamassa	E_{din} [MPa]					
	28 dias		90 dias		180 dias	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
NHL_M	4142	127	6469	217	6746	227
NHL_H	5181	467	6982	181	7243	198
NHL_S	4094	82	4447	190	4694	170
NHL_10Mk_M	5457	172	5514	399	4788	110
NHL_10Mk_H	9185	251	9425	965	8285	306
NHL_10Mk_S	4951	743	4256	320	4559	762
NHL_20Mk_M	8904	219	7271	615	5875	963
NHL_20Mk_H	12786	1444	11861	890	8828	1211
NHL_20Mk_S	7746	246	8382	705	6959	521

Nota: M – Cura marítima; H – Cura húmida; S – Cura standard

Uma análise mais global permite constatar que a cura H apresenta maiores valores de E_{din} e em oposição a cura S apresenta os menores. De um modo geral, dos 28 para os 90 dias há um aumento do valor do E_{din} , excetuando as NHL_20Mk nas curas M e H e a NHL_10Mk na cura S. Referir também

que, de um modo geral, aos 180 dias os valores do E_{din} das argamassas têm tendência para diminuir em relação aos 90 dias, à exceção das argamassas NHL e NHL_10Mk_S

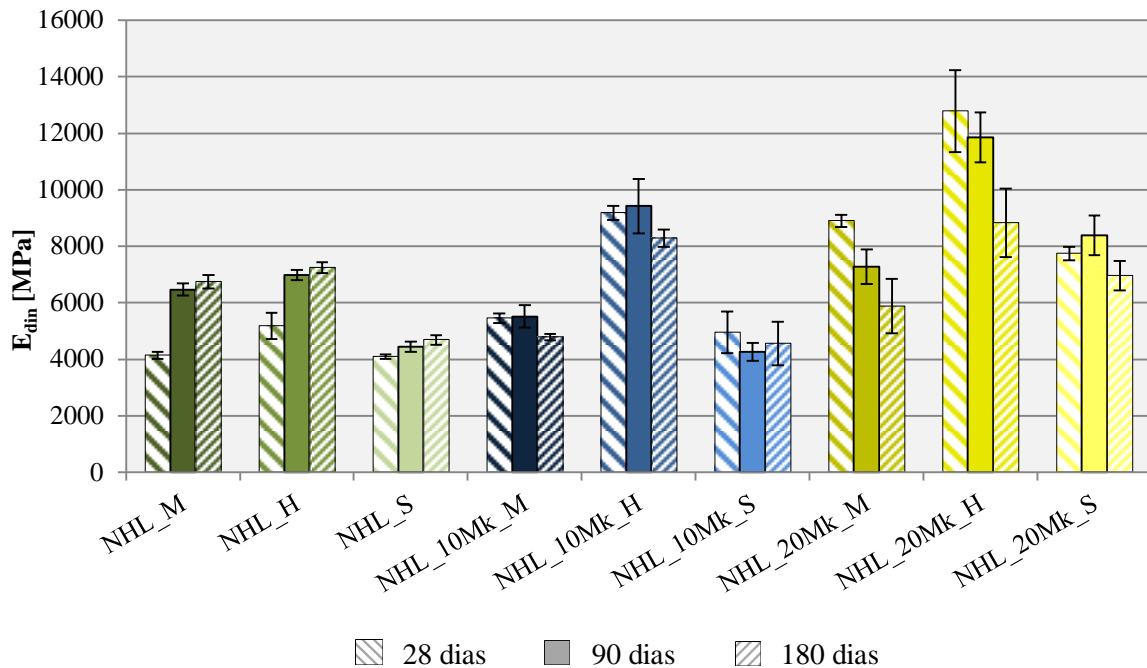


Figura 4.1 – Módulo de elasticidade dinâmico de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias

A análise da Figura 4.2 permite observar a evolução dos valores de E_{din} das argamassas em função do teor de metacaulino, em cada ambiente de cura, às três idades de ensaio. A comparação é efetuada tendo como referência a argamassa sem Mk em cada cura:

- 28 dias (Figura 4.2a)

Aos 28 dias a evolução dos valores de E_{din} foi crescente em todas as curas de acordo com o teor de metacaulino, tendo as argamassas NHL_10Mk e NHL_20Mk registado aumentos do seu valor de E_{din} em relação ao da argamassa referência. O Mk indicia uma redução da deformabilidade das argamassas.

- 90 dias (Figura 4.2b)

Aos 90 dias registou-se na cura M um decréscimo de E_{din} da argamassa NHL_10Mk e um aumento da argamassa NHL_20Mk; na cura H registou-se uma evolução crescente com o teor de metacaulino, apresentando a argamassa NHL_20Mk um valor de E_{din} superior à argamassa NHL_10Mk; na cura S a argamassa NHL_10Mk apresenta um valor semelhante à argamassa referência, enquanto a argamassa NHL_20Mk regista um aumento do valor de E_{din} .

- 180 dias (Figura 4.2c)

Aos 180 dias registou-se na cura M um decréscimo do valor de E_{din} das duas argamassas apresentando a argamassa NHL_20Mk um valor de E_{din} superior à argamassa NHL_10Mk; na cura H registou-se uma evolução crescente com o teor de metacaulino; na cura S, a argamassa NHL_10Mk apresenta um valor semelhante à argamassa referência, enquanto a argamassa NHL_20Mk regista um

aumento do seu de E_{din} . De um modo geral o E_{din} aos 180 dias acompanha o desenvolvimento do E_{din} aos 90 dias (embora com valores por vezes mais baixos nas argamassas com Mk).

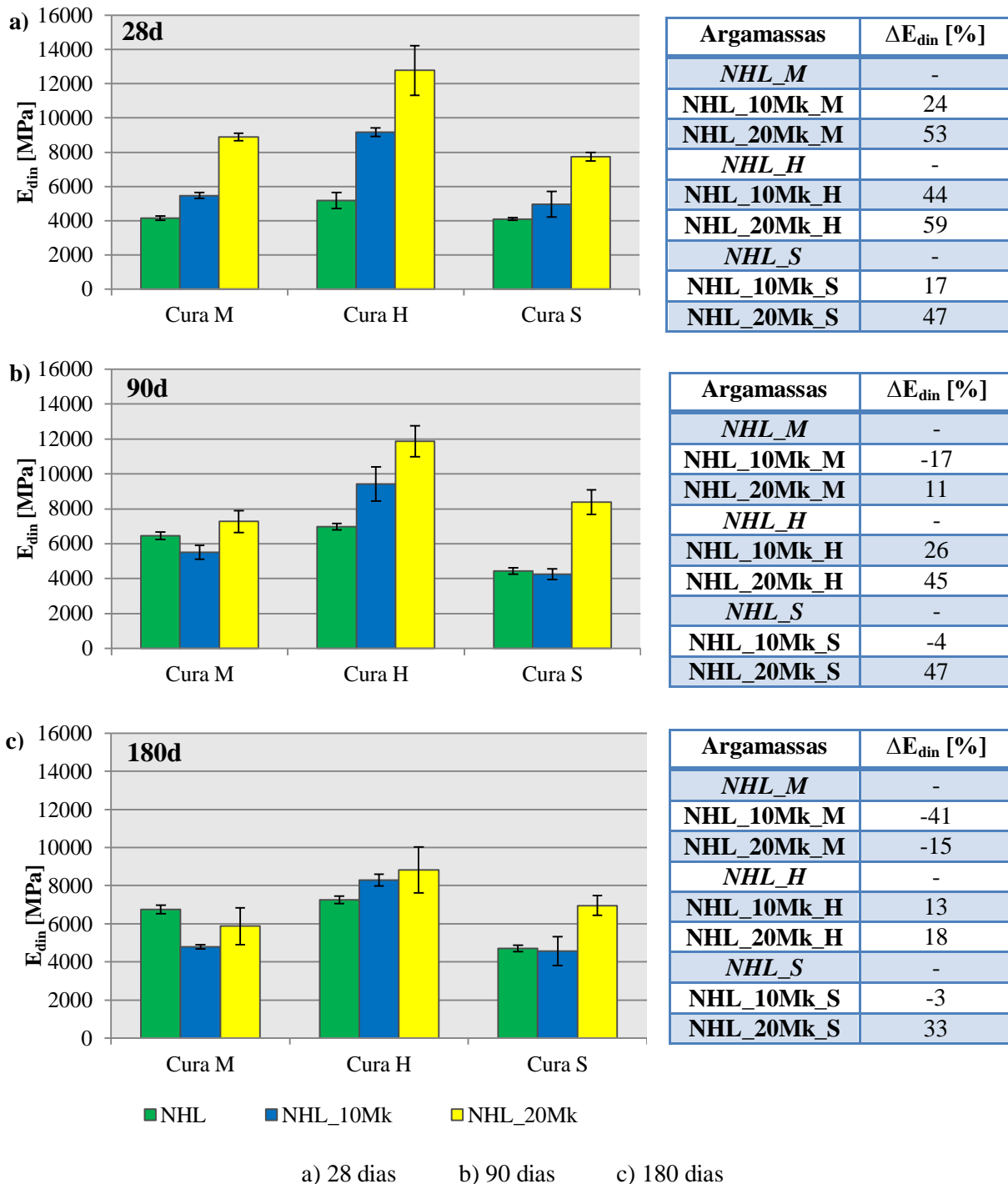


Figura 4.2 – Módulo de elasticidade dinâmico e variação face à argamassa de referência em cada cura

4.2.2 Resistências à tração por flexão

O Quadro 4.3 regista os valores médios e desvios padrão da resistência à tração, R_t , de todas as argamassas às idades de 28, 90 e 180 dias. Na Figura 4.3 pode ser consultada a evolução de todas as

argamassas com a idade. A Figura 4.4 apresenta a evolução dos valores de R_t em cada cura, tendo como referência a argamassa NHL, às idades de 28, 90 e 180 dias.

No anexo V (Tabela V.5) podem ser consultados os valores individuais obtidos nas leituras efetuadas para cada provete de cada argamassa.

Quadro 4.3 – Valores médios e desvios padrão da resistência à tração

Argamassa	R_t [MPa]					
	28 dias		90 dias		180 dias	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
NHL_M	0,50	0,02	1,06	0,01	1,14	0,03
NHL_H	0,87	0,05	1,19	0,05	1,27	0,16
NHL_S	0,52	0,04	0,53	0,04	0,58	0,04
NHL_10Mk_M	0,88	0,03	0,84	0,12	0,88	0,05
NHL_10Mk_H	0,75	0,09	1,30	0,14	1,38	0,03
NHL_10Mk_S	0,84	0,13	0,71	0,10	0,64	0,11
NHL_20Mk_M	1,14	0,02	1,13	0,10	0,88	0,07
NHL_20Mk_H	1,39	0,16	1,49	0,14	1,33	0,10
NHL_20Mk_S	1,11	0,06	0,85	0,07	1,13	0,04

Uma análise mais global da Figura 4.3 permite constatar que a cura H apresenta os maiores valores de R_t , enquanto a cura S apresenta os menores. A evolução com a idade nas diversas argamassas não tem um padrão definido à exceção das argamassas NHL sem Mk que apresentam um aumento do seu valor de R_t dos 28 para os 90 dias, apresentando aos 180 dias uma tendência para a estabilização desses valores.

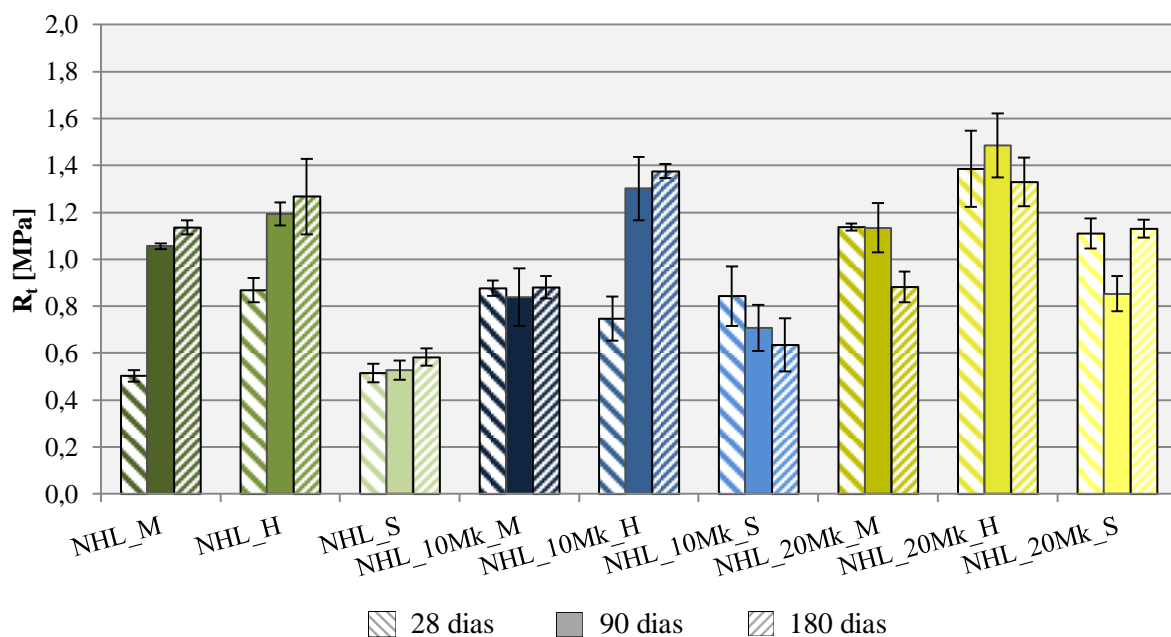


Figura 4.3 – Resistência à tração de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias

A análise da Figura 4.4 permite observar o evoluir dos valores de R_t das argamassas em função da percentagem de metacaulino em cada ambiente de cura, às três idades de ensaio. A comparação é efetuada tendo com referência a argamassa sem Mk em cada cura:

- 28 dias (Figura 4.4a)

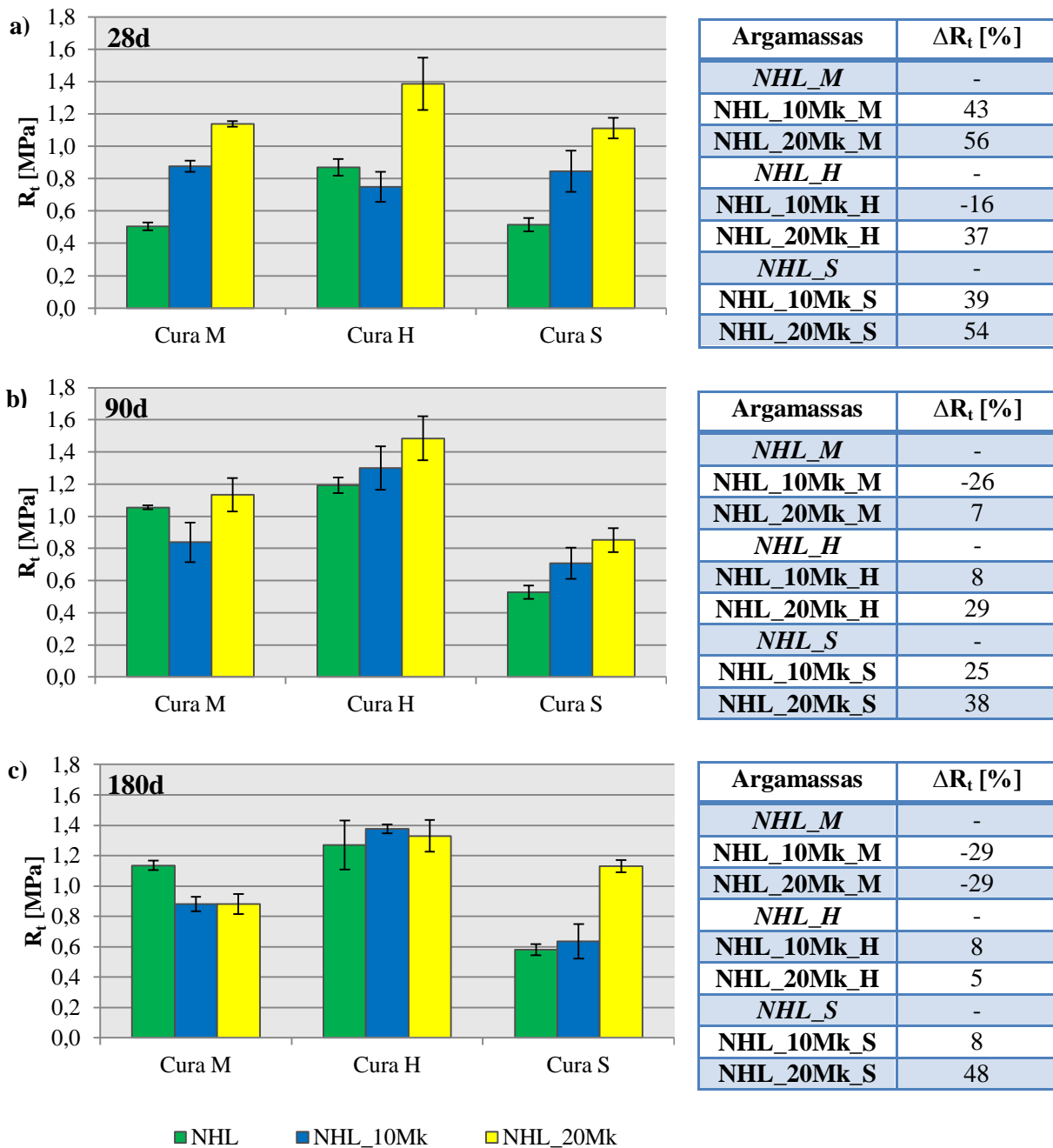
A evolução dos valores de R_t foi crescente nas curas M e S de acordo com a percentagem de metacaulino; na cura H a argamassa NHL_10Mk registou um valor de R_t inferior à referência registando a NHL_20Mk um valor superior.

- 90 dias (Figura 4.4b)

Regista-se na cura M um valor de R_t da argamassa NHL_10Mk inferior à referência sendo superior na argamassa NHL_20Mk; nas curas H e S registou-se uma evolução crescente do valor de R_t de acordo com a percentagem de metacaulino.

- 180 dias (Figura 4.4c)

Registou-se na cura M um decréscimo idêntico do valor de R_t das duas argamassas com Mk; na cura H registam-se valores semelhantes das duas argamassas com Mk e estabilizados de acordo com a referência; na cura S a argamassa NHL_10Mk registou um valor idêntico à argamassa referência, enquanto a argamassa NHL_20Mk regista um valor superior.



a) 28 dias b) 90 dias c) 180 dias

Figura 4.4 – Resistência à tração e variação face à argamassa de referência

4.2.3 Resistência à compressão

O Quadro 4.4 regista os valores médios e desvios padrão dos valores de resistência à compressão, R_c , de todas as argamassas as idades de 28, 90 e 180 dias. Na Figura 4.5 pode ser consultada a evolução da R_c de todas as argamassas, em todas as curas, com a idade. A Figura 4.6 apresenta a evolução dos valores de R_c em cada cura, tendo como referência a argamassa NHL, às idades de 28, 90 e 180 dias. No anexo V (Tabela V.5) podem ser consultados os valores individuais obtidos nas leituras efetuadas para cada provete de cada argamassa.

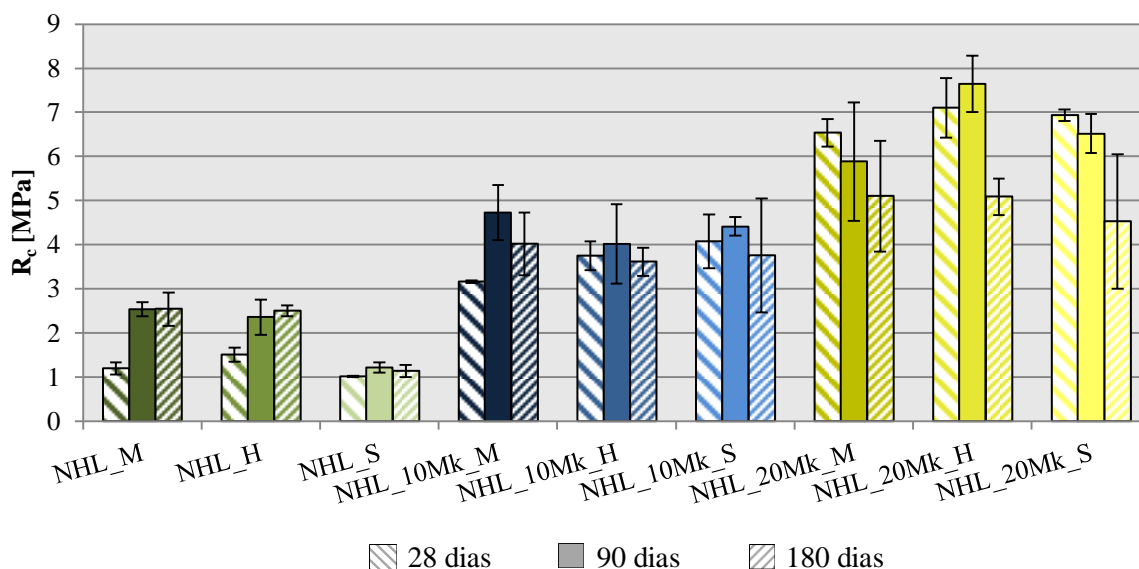
Quadro 4.4- Valores médios e desvios padrão da resistência à tração

Argamassa	R_c [MPa]					
	28 dias		90 dias		180 dias	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
NHL_M	1,19	0,14	2,54	0,16	2,54	0,37
NHL_H	1,51	0,16	2,36	0,40	2,50	0,12
NHL_S	1,01	0,02	1,22	0,12	1,14	0,13
NHL_10Mk_M	3,16	0,03	4,73	0,62	4,02	0,71
NHL_10Mk_H	3,75	0,32	4,02	0,9	3,62	0,32
NHL_10Mk_S	4,07	0,61	4,42	0,21	3,76	1,29
NHL_20Mk_M	6,54	0,31	5,88	1,34	5,10	1,25
NHL_20Mk_H	7,10	0,68	7,64	0,64	5,09	0,41
NHL_20Mk_S	6,93	0,13	6,52	0,44	4,53	1,52

Uma análise mais global da Figura 4.5 permite constatar que, à exceção das argamassas NHL sem Mk, onde a cura S apresenta os valores mais baixos de R_c , não há uma cura específica nas argamassas com metacaulino que se destaque pelos seus valores mais ou menos elevados, sendo todos valores das mesmas ordens de grandeza, e proporcionais às percentagens de metacaulino.

Os valores de R_c das argamassas NHL_20Mk são os mais elevados, estando do lado oposto as argamassas NHL sem Mk, com os valores mais baixos. No entanto as argamassas com 10% de Mk sobressaem com os valores mais estáveis em termos da idade e do tipo de cura, intermédios entre as argamassas sem Mk e com 20% de Mk.

Aos 90 dias as argamassas NHL atingem valores de R_c semelhantes aos dos 180 dias, enquanto as argamassas NHL_10Mk e NHL_20Mk sofrem um decréscimo dos seus valores aos 180 dias (mais acentuado nas argamassas com 20% de Mk).

**Figura 4.5** – Resistência à compressão de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias

A análise da Figura 4.6 permite observar a evolução dos valores de R_c das argamassas em função do teor de metacaulino em cada cura, às três idades de ensaio. A comparação é efetuada tendo com referência a argamassa NHL em cada cura. Constata-se que em todas as idades a evolução foi crescente.

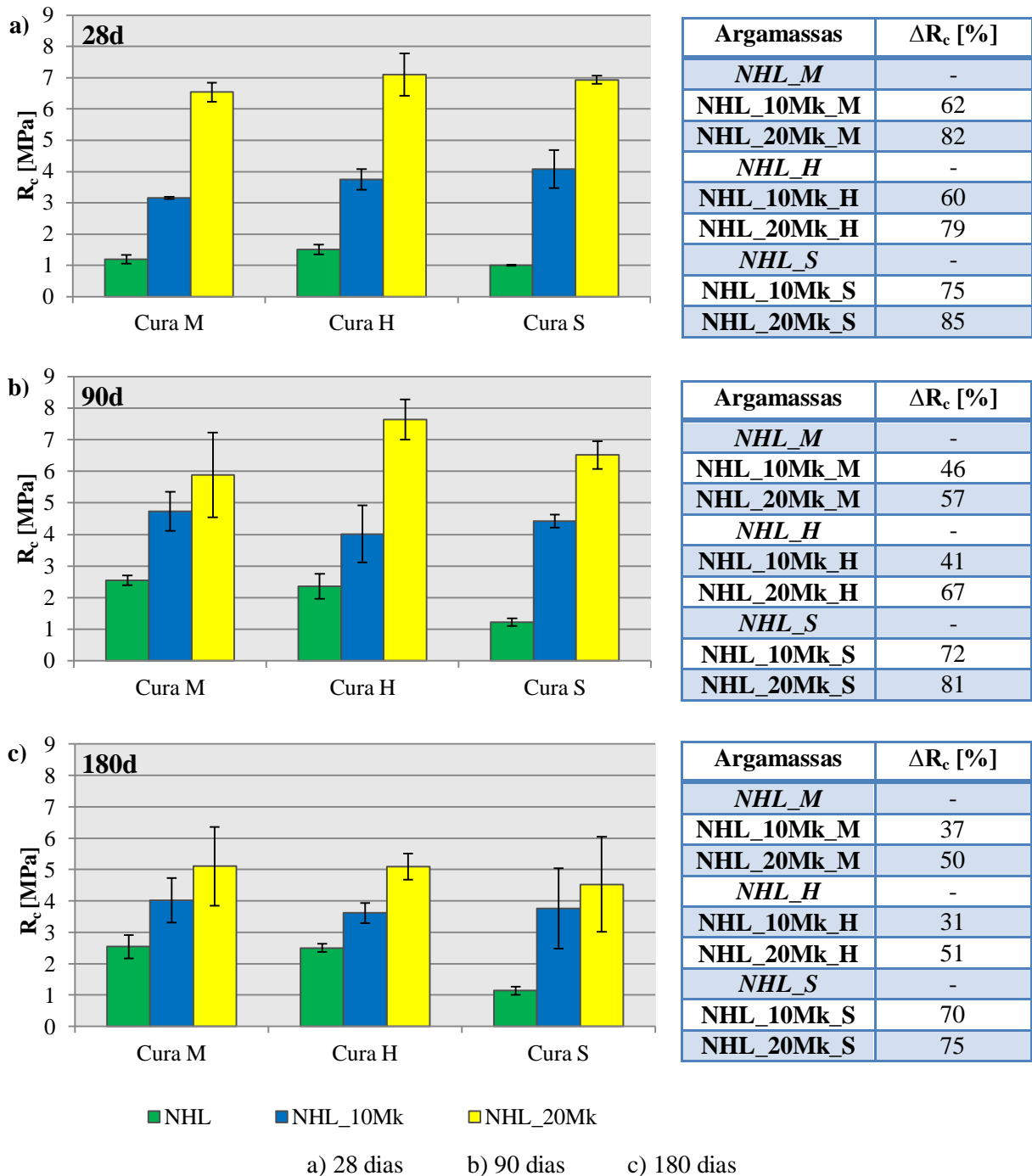


Figura 4.6 – Resistência à compressão e variação face à argamassa de referência

4.2.4 Absorção de água por capilaridade

Uma análise da curva de absorção de água por ascensão capilar permite obter dois parâmetros: o valor assintótico, VA, valor máximo da quantidade de água absorvida pela argamassa; o coeficiente de capilaridade, CC, obtido através do declive da reta do troço inicial da curva de absorção de água, que traduz a maior ou menor velocidade de absorção de água em cada argamassa.

De um modo geral são mais favoráveis argamassas que apresentem menores valores de CC e de VA, com menor velocidade de absorção de água e menor quantidade total de água absorvida.

No Quadro 4.5 registam-se os valores médios e desvios-padrão do valor assintótico, VA, e do coeficiente de capilaridade, CC, de todas as argamassas. A Figura 4.9 apresenta a evolução do ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas sujeitas as três curas às idades dos 28, 90 e 180 dias enquanto a Figura 4.10 particulariza essa absorção nos primeiros 60 minutos do ensaio.

Quadro 4.5 – Valores médios e desvio padrão do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico

Argamassas	28 dias				90 dias				180 dias			
	VA [kg/m ²]		CC [kg/(m ² .min ^{0,5})]		VA [kg/m ²]		CC [kg/(m ² .min ^{0,5})]		VA [kg/m ²]		CC [kg/(m ² .min ^{0,5})]	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
NHL_M	21,9	0,5	3,5	0,1	19,7	0,7	2,8	0,1	19,4	1,4	3,1	0,3
NHL_H	21,9	1,6	2,9	0,4	20,2	1,5	2,6	0,1	19,7	2,1	2,7	0,2
NHL_S	21,4	1,1	3,6	0,2	20,1	1,5	3,6	0,2	19,7	0,6	3,6	0,1
NHL_10Mk_M	23,9	2,9	2,4	0,2	19,6	0,9	2,2	0,1	20,6	0,7	2,3	0,2
NHL_10Mk_H	22,5	1,7	2,1	0,0	20,2	1,5	2,6	0,1	22,9	1,5	2,3	0,1
NHL_10Mk_S	21,8	1,9	2,2	0,1	21,0	1,3	2,3	0,2	21,1	2,2	2,4	0,4
NHL_20Mk_M	22,7	0,9	1,6	0,1	19,7	1,3	1,7	0,1	20,7	0,6	2,0	0,2
NHL_20Mk_H	23,1	0,6	1,5	0,0	16,9	0,4	1,2	0,2	20,8	0,5	2,1	0,3
NHL_20Mk_S	22,7	0,8	1,7	0,2	20,8	1,1	1,6	0,2	21,9	1,6	1,9	0,0

Na Figura 4.7 pode ser consultada a evolução dos valores de VA em todas as argamassas a todas as idades. Todas as argamassas têm os maiores valores assintóticos aos 28 dias, decrescendo aos 180 dias (exceto no caso da argamassa NHL_10Mk_H). De uma forma geral as argamassas NHL sem Mk apresentam os menores valores assintóticos em todas as idades (à exceção do valor da argamassa NHL_20Mk na cura H aos 90 dias, que regista um grande decréscimo em relação aos 28 dias). No entanto, de um modo geral o acréscimo face às argamassas com Mk aos 180 dias não se pode considerar ser muito elevado (tendo ainda por cima em conta o facto dos VA serem calculados com base em meios provetes com volume que apenas em termos médios se pode considerar semelhante).

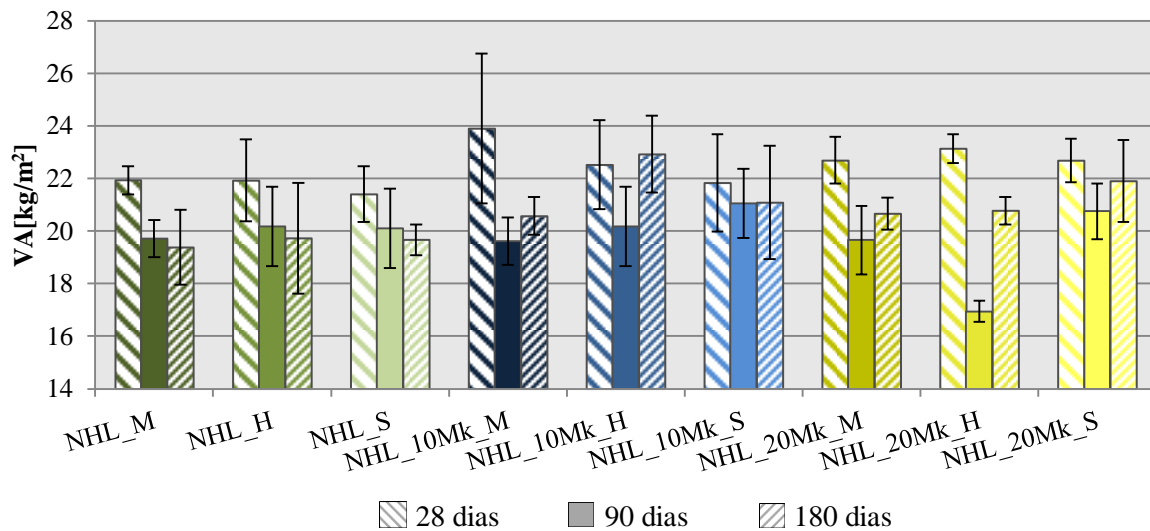


Figura 4.7 – Valor assintótico de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias

Na Figura 4.8 pode ser consultada a evolução dos valores de CC em todas as argamassas a todas as idades. É possível observar que as argamassas NHL_20Mk apresentam os menores valores de CC enquanto as argamassas NHL apresentam os maiores. A cura S apresenta no geral uma estabilização dos valores com a idade em todas as argamassas. A registrar também o aumento do valor de CC dos 28 para os 180 dias nas argamassa NHL_20Mk em todas curas e a grande estabilidade de valores nas argamassas com 10% de Mk, independentemente da cura e especialmente entre os 28 e 180 dias de idade.

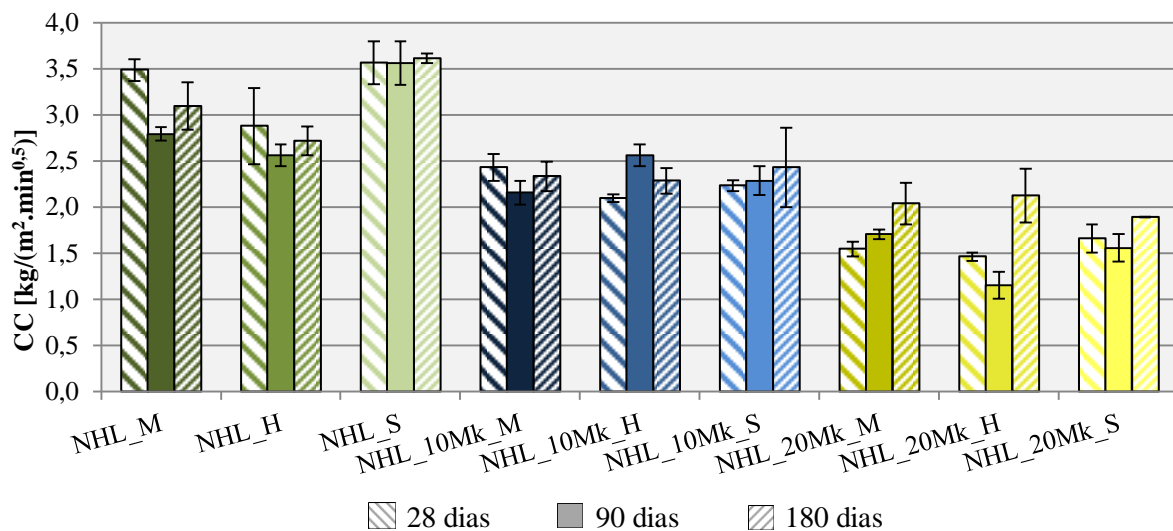


Figura 4.8 – Coeficiente de capilaridade de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias

Uma análise da Figura 4.9 permite observar o evoluir das curvas de absorção de água das argamassas em função da percentagem de metacaulino, em cada ambiente de cura, às três idades de ensaio. Simultaneamente, através dos gráficos de barras, permite observar a evolução a cada idade, tendo como referência argamassa sem Mk:

- 28 dias (Figura 4.9a)

Em termos de absorção máxima de água, todas as argamassas apresentam valores semelhantes, registrando-se ligeiros aumentos de VA com o aumento da percentagem de metacaulino.

- 90 dias (Figura 4.9b)

Em termos de absorção máxima de água, todas as argamassas apresentam valores semelhantes registrando-se, registrando-se um comportamento invulgar da argamassa NHL_20Mk da cura H.

- 180 dias (Figura 4.9c)

O comportamento é semelhante ao registado aos 28 dias, uma vez que todas as argamassas apresentam valores semelhantes, apenas com ligeiros aumentos de VA com o aumento da percentagem de metacaulino.

Analisando a Figura 4.10 pode observar-se o comportamento de cada argamassa em termos de absorção de água nos primeiros 60 minutos de ensaio, o que permite obter o CC a partir do declive de cada curva. Observando cada idade tendo a argamassa sem Mk como referência:

- 28 dias (Figura 4.10a)

Cada conjunto de argamassas tem um andamento semelhante de acordo com a percentagem de metacaulino. Em todas as curas o CC vai diminuindo com o aumento da percentagem de metacaulino.

- 90 dias (Figura 4.10b)

Nas curas M e S a evolução do CC é decrescente com o aumento da percentagem de metacaulino; na cura H as argamassas NHL e NHL_10Mk têm valores idênticos, registrando a argamassa NHL_20Mk, à semelhança do que sucede com o VA, um valor não expectável.

- 180 dias (Figura 4.10c)

As evoluções são semelhantes às observadas aos 28 dias.

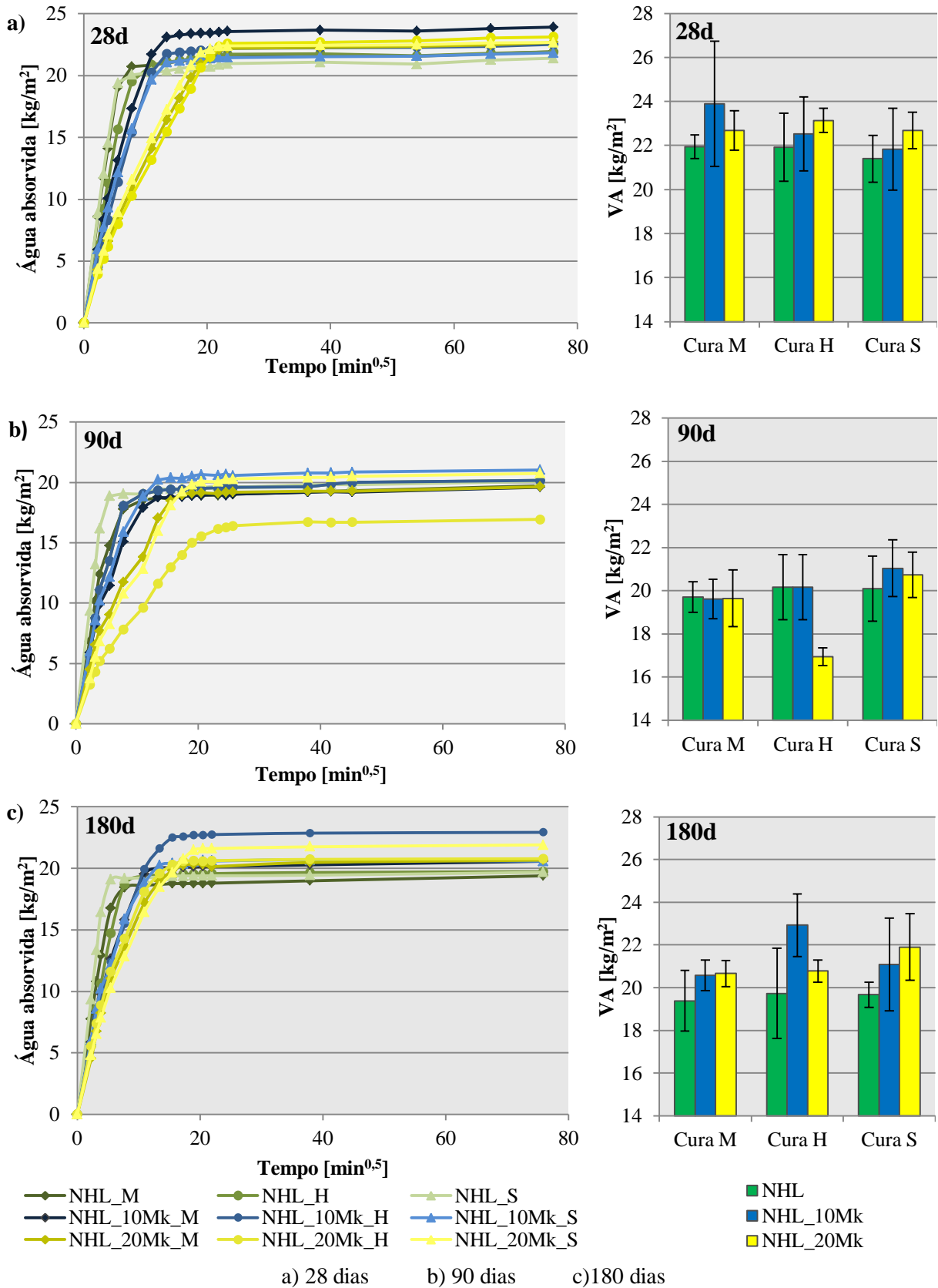


Figura 4.9 – Curvas de absorção de água por capilaridade e valor assintótico de todas as argamassas

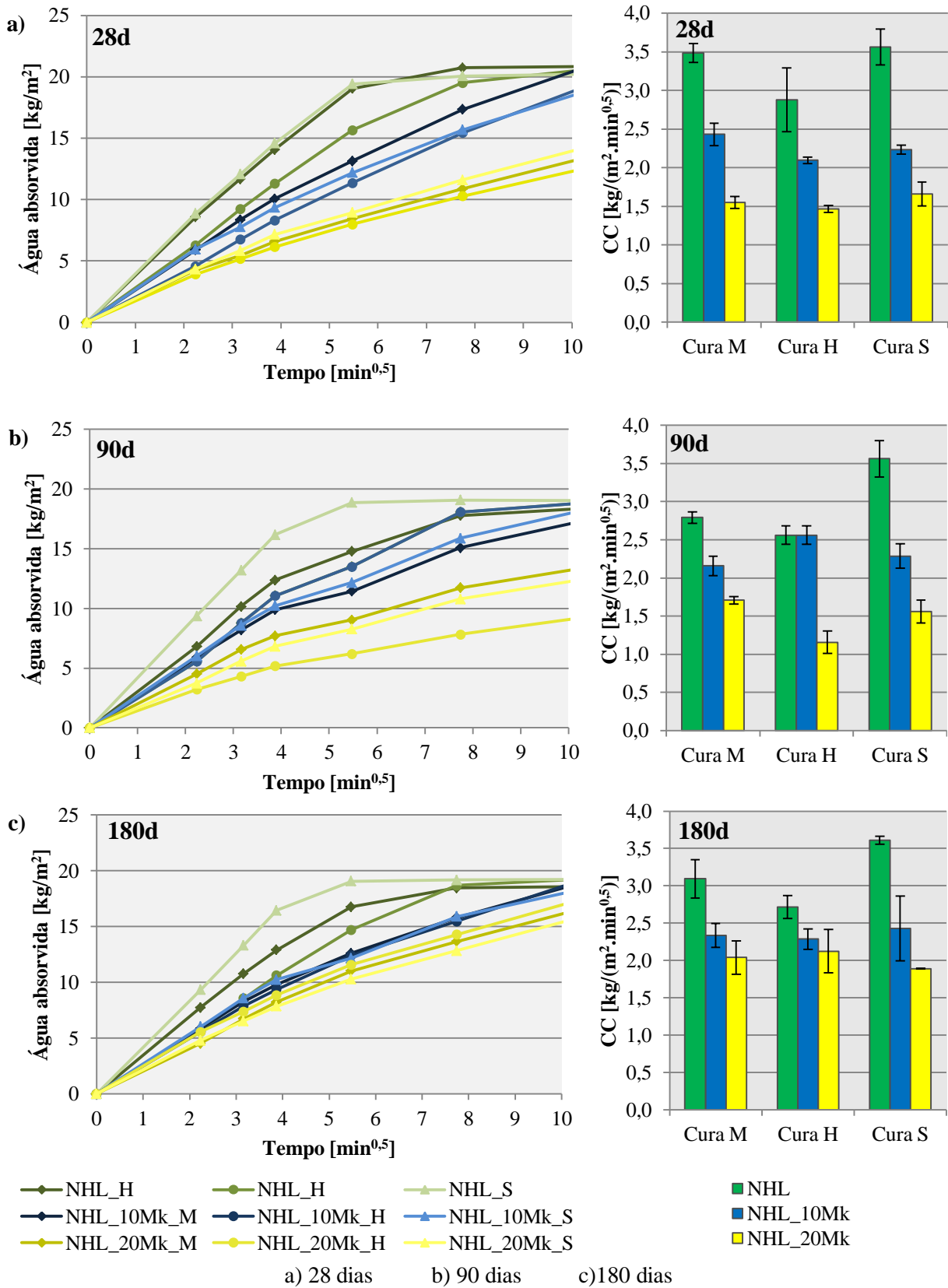


Figura 4.10 – Primeiros 60 minutos de absorção de água por ascensão capilar e coeficiente de capilaridade de todas as argamassas

4.2.5 Secagem

Uma análise da curva de secagem com o tempo em abcissas permite obter dois parâmetros: o índice de secagem, IS, valor que traduz a evolução da secagem global; a taxa de secagem, TS, obtida através do declive da reta do troço inicial da curva de secagem, que traduz a maior ou menor velocidade de secagem em cada argamassa.

De um modo geral são mais favoráveis argamassas que apresentem menores valores de IS e maiores de TS, com maior facilidade de secagem global e maior velocidade de secagem inicial.

No Quadro 4.6 registam-se os valores médios e desvios-padrão da TS e IS de todas as argamassas. Na Figura 4.13 podem ser consultadas as curvas de secagem de todas as argamassas em todas as curas às idades de 28, 90 e 180 dias.

Quadro 4.6 – Valores médios e desvio padrão da taxa de secagem e índice de secagem

Argamassas	28 dias				90 dias				180 dias			
	TS [kg/(m ² .h)]		IS [-]		TS [kg/(m ² .h)]		IS [-]		TS [kg/(m ² .h)]		IS [-]	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
NHL_M	0,13	0,01	0,35	0,02	0,10	0,01	0,32	0,01	0,10	0,02	0,29	0,02
NHL_H	0,12	0,00	0,35	0,03	0,11	0,01	0,36	0,04	0,11	0,01	0,34	0,02
NHL_S	0,13	0,01	0,34	0,02	0,09	0,01	0,32	0,02	0,09	0,02	0,32	0,07
NHL_10Mk_M	0,14	0,02	0,40	0,02	0,10	0,00	0,35	0,01	0,09	0,00	0,42	0,01
NHL_10Mk_H	0,12	0,01	0,45	0,01	0,09	0,02	0,42	0,01	0,11	0,02	0,41	0,03
NHL_10Mk_S	0,14	0,00	0,38	0,04	0,10	0,03	0,37	0,01	0,10	0,01	0,37	0,00
NHL_20Mk_M	0,12	0,00	0,49	0,02	0,09	0,02	0,43	0,01	0,10	0,01	0,43	0,02
NHL_20Mk_H	0,10	0,01	0,55	0,02	0,11	0,01	0,40	0,04	0,10	0,01	0,40	0,01
NHL_20Mk_S	0,12	0,00	0,47	0,01	0,10	0,00	0,42	0,02	0,10	0,01	0,41	0,03

Na Figura 4.11 pode ser consultada a evolução da TS em todas as argamassas, a todas as idades. Uma análise mais global permite observar que, com a idade, a TS decresce em todas as argamassas, no entanto não há uma argamassa ou tipo de argamassas que se destaquem claramente pelo seu maior ou menor valor de TS, apresentando-se todas elas com valores muito semelhantes.

Na Figura 4.12 pode ser consultada a evolução do IS em todas as argamassas a todas as idades. Uma análise mais global permite observar que, com a idade, o IS decresce em todas as argamassas. As argamassas NHL_20Mk apresentam os maiores valores de IS em todas as idades (mais difícil secagem), estando na situação oposta as argamassas NHL, com os menores valores. De destacar também que a cura H é a que apresenta os maiores valores de IS.

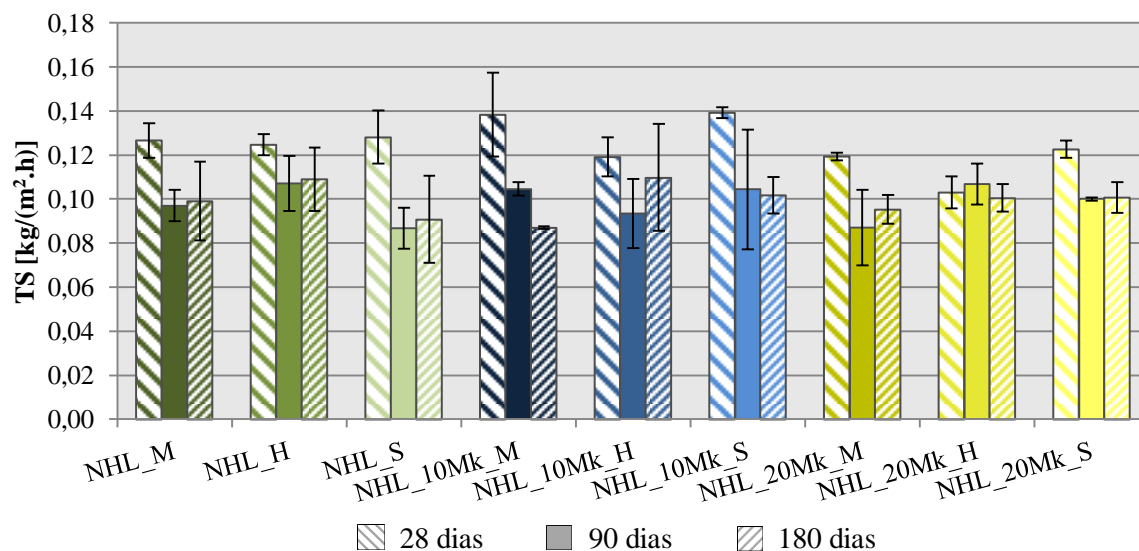


Figura 4.11 – Taxa de secagem de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias

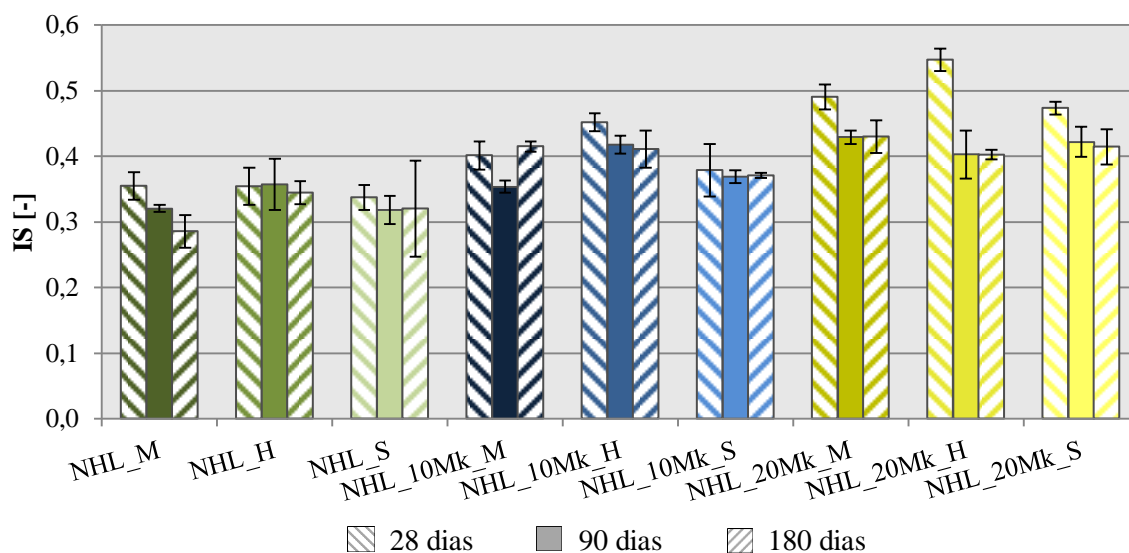


Figura 4.12 – Índice de secagem de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias

Observando a Figura 4.13 é possível observar o evoluir do ensaio de secagem através da curva de secagem; na Figura 4.14 é possível observar a evolução dos dois parâmetros retirados do ensaio de secagem, IS e TS. Analisando as argamassas a cada idade, tendo como referência a argamassa sem Mk:

- 28 dias (Figura 4.14a)

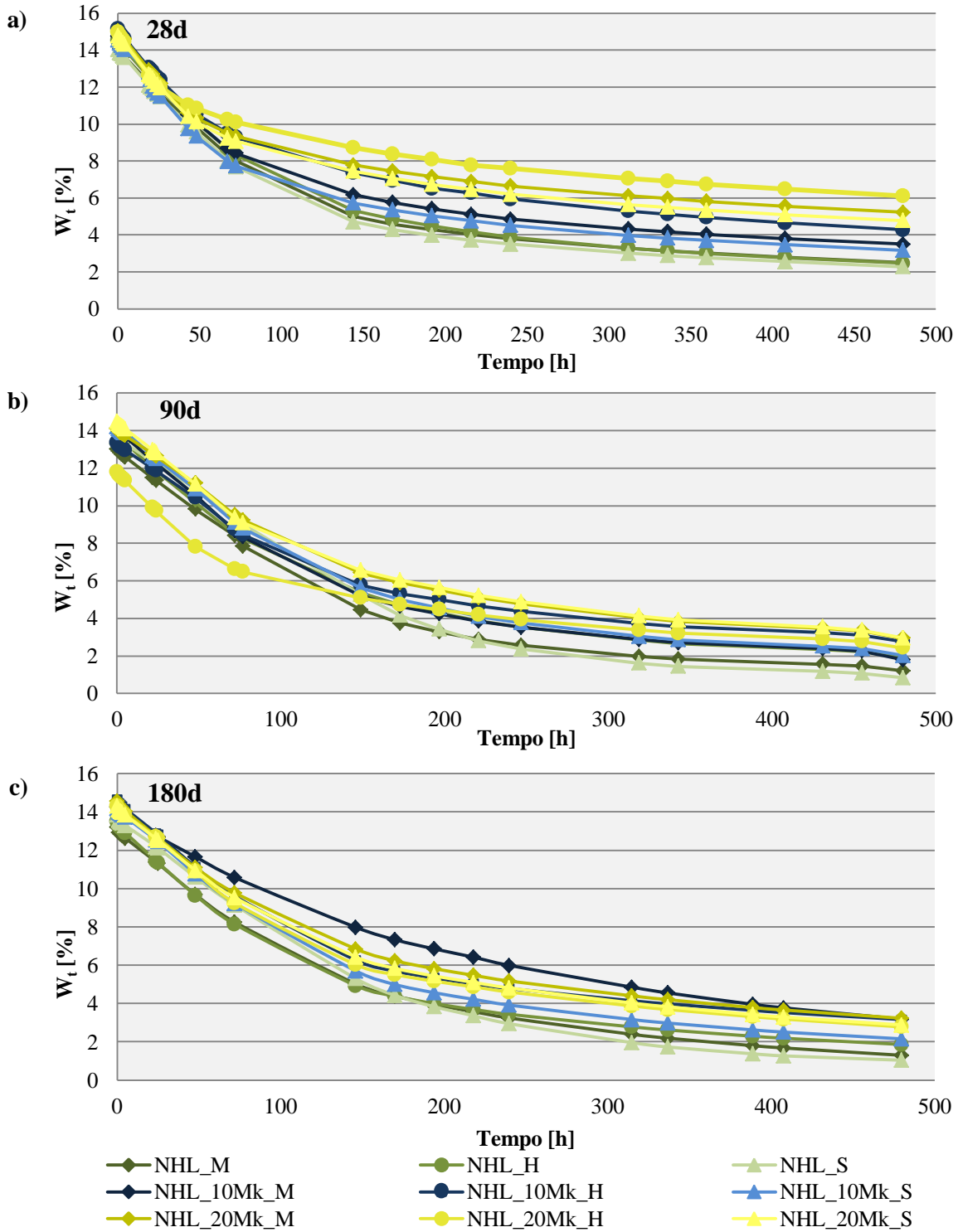
Em termos de IS, em todas as curas o valor aumenta com o aumento da percentagem de metacaulino, enquanto a TS diminui ligeiramente com o aumento de metacaulino em todas as curas.

- 90 dias (Figura 4.14b)

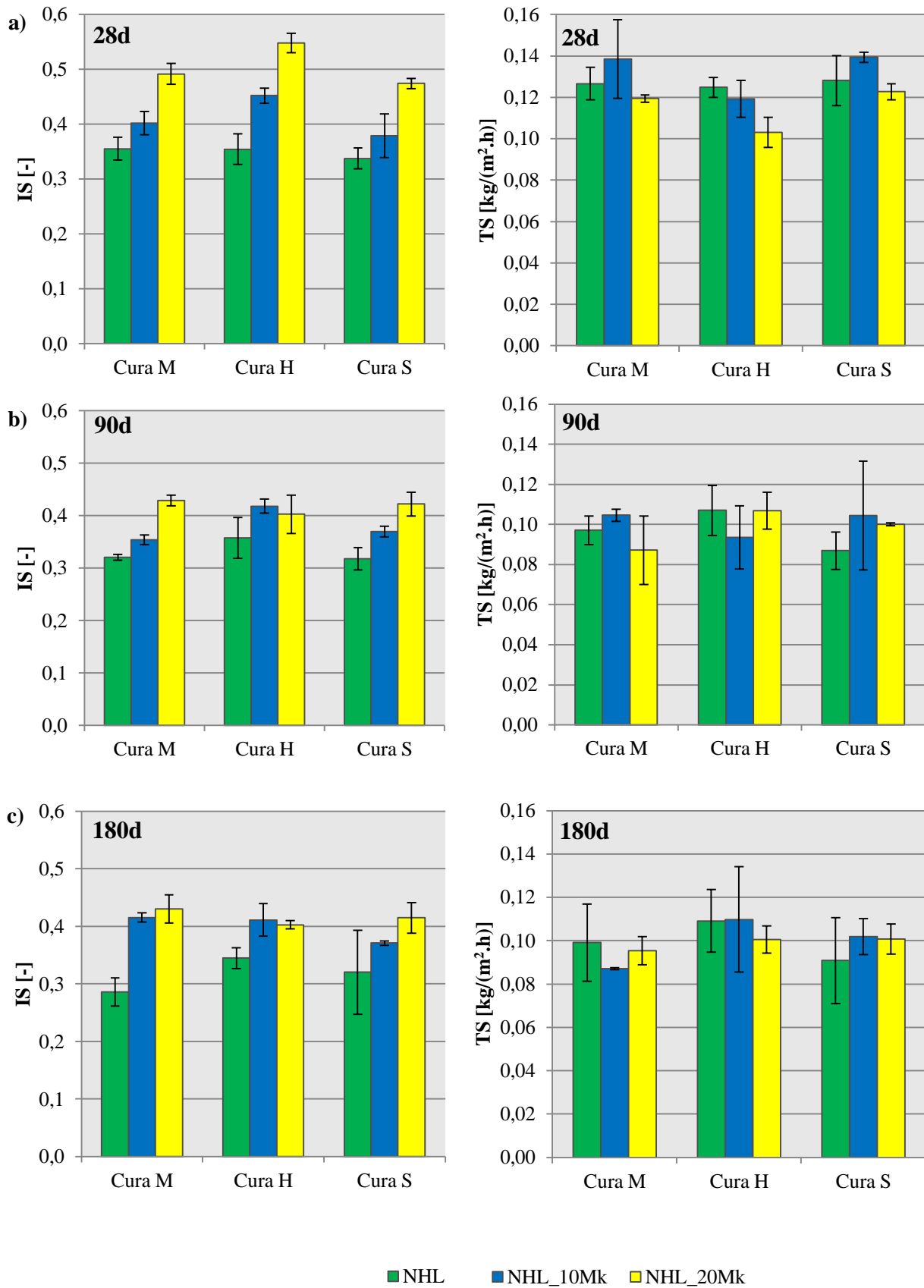
Os valores de IS registam evolução semelhante ao ocorrido aos 28 dias, enquanto a TS apresenta uma evolução díspar em cada uma das curas, sendo decrescente na cura M, estável na cura H e crescente na cura S.

- 180 dias (Figura 4.14c)

Os valores de IS registam mais uma vez uma evolução semelhante ao ocorrido nas idades anteriores, enquanto a TS apresenta uma evolução decrescente na cura M e H e crescente na cura S.



a) 28 dias b) 90 dias c) 180 dias
Figura 4.13 – Curvas de secagem de todas as argamassas



a) 28 dias b) 90 dias c) 180 dias
Figura 4.14 – Índice de secagem e taxa de secagem de todas as argamassas

4.2.6 Condutibilidade térmica

No Quadro 4.7 podem ser consultados os valores médios e desvios padrão da condutibilidade térmica de todas as argamassas em todas as curas aos 28 e 90 dias. Aos 90 dias apenas se realizou uma leitura em cada lote de argamassas, uma vez que se aferiu que não havia grandes alterações face aos 28 dias; por esse motivo não se registaram desvios padrão desses valores. Face aos valores obtidos aos 28 e 90 dias optou-se por não se realizarem leituras aos 180 dias, uma vez que efetuá-las exigiria um processo moroso e sem grandes ganhos para os resultados finais desta dissertação. Considerou-se que os valores obtidos já indicavam a gama de valores para este tipo de argamassas e esta não tinha apresentado tendência de variação explícita dos 28 para os 90 dias. Na Figura 4.15 regista-se a evolução dos valores de condutibilidade térmica.

Quadro 4.7 – Valores médios e desvios padrão dos valores condutibilidade térmica

Argamassas	28dias		90dias	
	λ (W/m ² .K)			
	Méd	DP	Méd	DP
NHL_M	0,837	0,024	0,852	-
NHL_H	0,878	0,020	0,944	-
NHL_S	0,875	0,019	0,796	-
NHL_10Mk_M	0,938	0,025	0,884	-
NHL_10Mk_H	0,970	0,055	1,003	-
NHL_10Mk_S	0,907	0,092	0,845	-
NHL_20Mk_M	1,015	0,015	1,105	-
NHL_20Mk_H	1,080	0,061	1,250	-
NHL_20Mk_S	0,942	0,017	0,926	-

Analisando a Figura 4.15 é possível observar que as argamassas NHL_20Mk apresentam os valores mais elevados de condutibilidade térmica ao contrário das argamassas NHL que apresentam os menores. Relativamente à cura, regista-se uma ligeira tendência para maiores valores de λ serem registados pelas curas H.

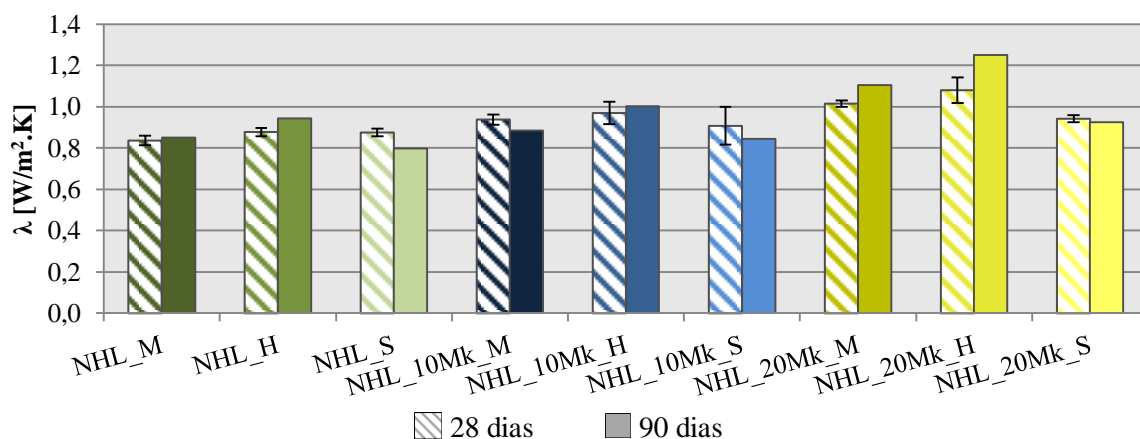


Figura 4.15 – Condutibilidade térmica de todas as argamassas aos 28 e 90 dias

4.2.7 Resistência aos sulfatos

As Figura 4.16 e 4.17 registam a evolução do ensaio de resistência aos sulfatos das diversas argamassas, aos 28 dias e 90 dias respetivamente. No anexo V (Tabela V.9 a V.10) pode ser consultada o quadro com os valores das perdas de massa de cada argamassa em cada idade de ensaio.

- 28 dias

Na Figura 4.16 é possível observar a evolução do ensaio de sulfatos aos 28 dias. Em relação ao comportamento de resistência aos ciclos de ensaio a que foram sujeitas as argamassas, as NHL_10Mk foram as que menor resistência ofereceram, começando a ter perdas de massa ao 7º ciclo e tendo sido totalmente destruídas antes do fim do ensaio; nestas argamassas a perda de massa ocorreu por fratura interior dos provetes e desagregação de pedaços. As argamassas NHL foram as que mais resistiram ao ensaio, tendo as primeiras perdas de massa ocorrido ao 14º ciclo e os respetivos provetes resistiram até ao fim do ensaio, embora com grandes perdas - na ordem dos 70% (à exceção dos da cura S, que foram totalmente destruídos antes do fim do ensaio).

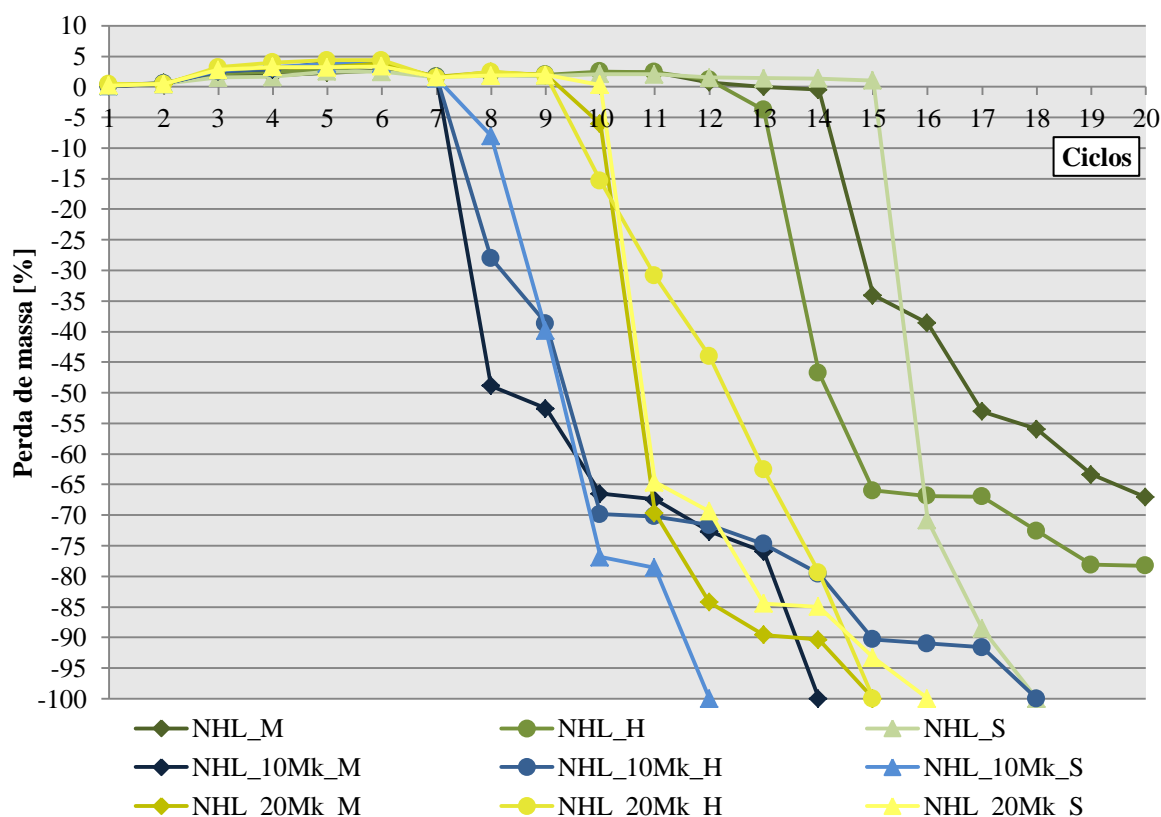


Figura 4.16 – Resistência aos sulfatos aos 28 dias

Na Figura 4.17 observa-se o aspeto dos provetes de todas as argamassas ao 10º ciclo de ensaio. É possível observar na figura que os provetes da argamassa NHL ainda se encontram intactos (apenas com alguma fissuração visível), enquanto no caso das argamassas com Mk a fissuração é bastante acentuada tendo sido as argamassas com 10Mk as que tiveram maior degradação de todas.



Figura 4.17 – Provetes após o 10º ciclo de ensaio, 28 dias

Em relação à rotura característica dos provetes destaca-se na Figura 4.18, as roturas dos provetes da argamassa NHL (Figura 4.18a) e das argamassas com metacaulino, NHL_10Mk e NHL_20Mk (Figura 4.18b). No caso dos provetes da argamassa NHL a rotura ocorre após desgaste superficial, até que chega ao núcleo, ocorre fratura e destrói o provete; já os provetes das argamassas com metacaulino apresentam fendas em todas as superfícies laterais, havendo no entanto uma fenda maior que faz com que o provete fique inclinado, denotando uma reação expansiva, perto do seu núcleo, ficando o material completamente destruído em volta deste (Figura 4.18c), que no fim é também desfeito.



a) NHL b) NHL_10Mk e NHL_20Mk c) Núcleo do provete NHL_10Mk

Figura 4.18 – Rotura dos provetes

- 90 dias

Na Figura 4.19 é possível observar a evolução do ensaio de sulfatos aos 90 dias, as argamassas NHL foram as que maior resistência ofereceram, tendo as primeiras perdas de massa perto do fim do ensaio e finalizando o mesmo com perdas de massa apenas da ordem dos 10%; as argamassas com metacaulino voltaram, a semelhança do sucedido aos 28 dias, a apresentar pior comportamento, tendo as primeiras perdas de massa entre os ciclos 5 e 10, tendo sido os provetes totalmente destruídos antes do fim do ensaio (com exceção da argamassa NHL_10Mk_S que foi até ao fim do ensaio com uma perda de massa de sensivelmente 65%). A esta idade a diferença entre as argamassas com 10% e 20% de Mk não foi tão diferenciada como aos 28 dias.

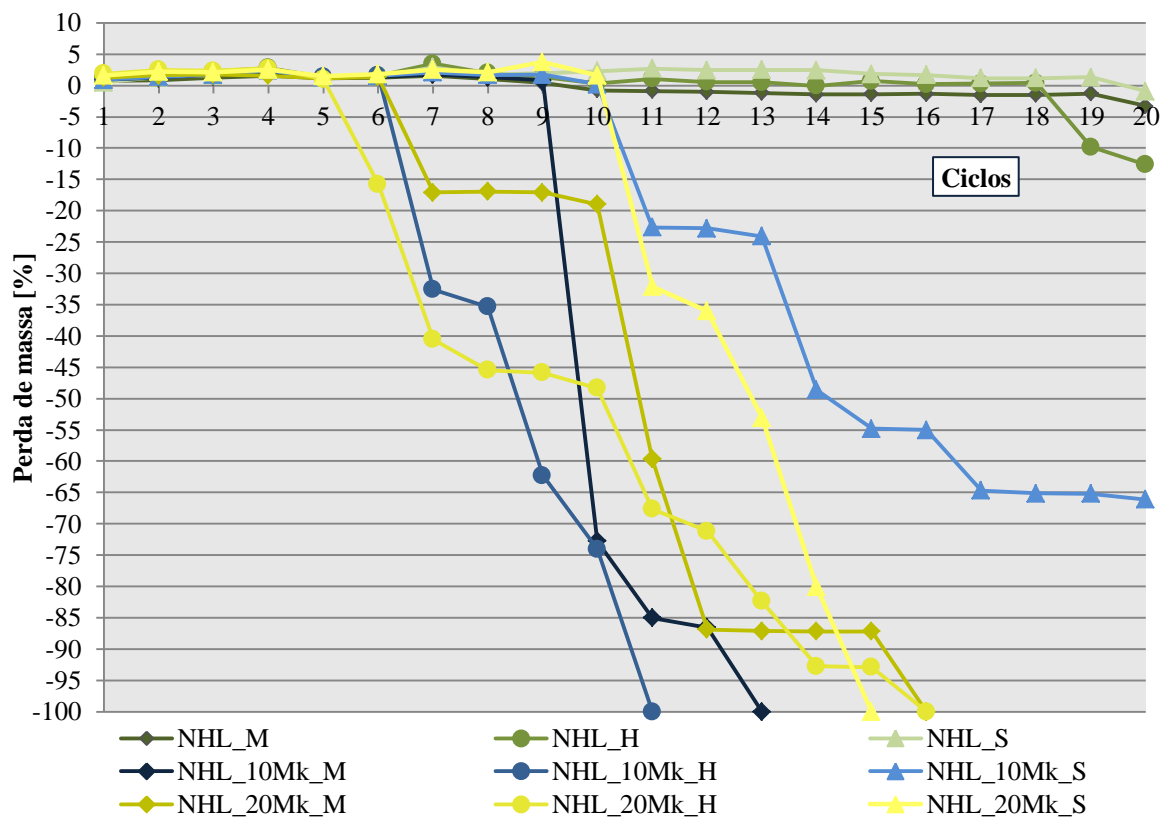


Figura 4.19 – Resistência aos sulfatos aos 90 dias

Na Figura 4.20 podem ser observadas por cura as evoluções com a idade da resistência aos sulfatos. Uma análise geral permite observar que as argamassas NHL têm uma significativa melhoria na sua resistência aos sulfatos com a idade; as argamassas NHL_10Mk também registam ligeira melhoria de comportamento à exceção da cura H; as argamassas NHL_20Mk não registam melhorias com a idade, sendo o comportamento semelhante entre as idades.

Em termos de roturas estas foram em tudo semelhantes às roturas ocorridas nos provetes aos 28 dias.

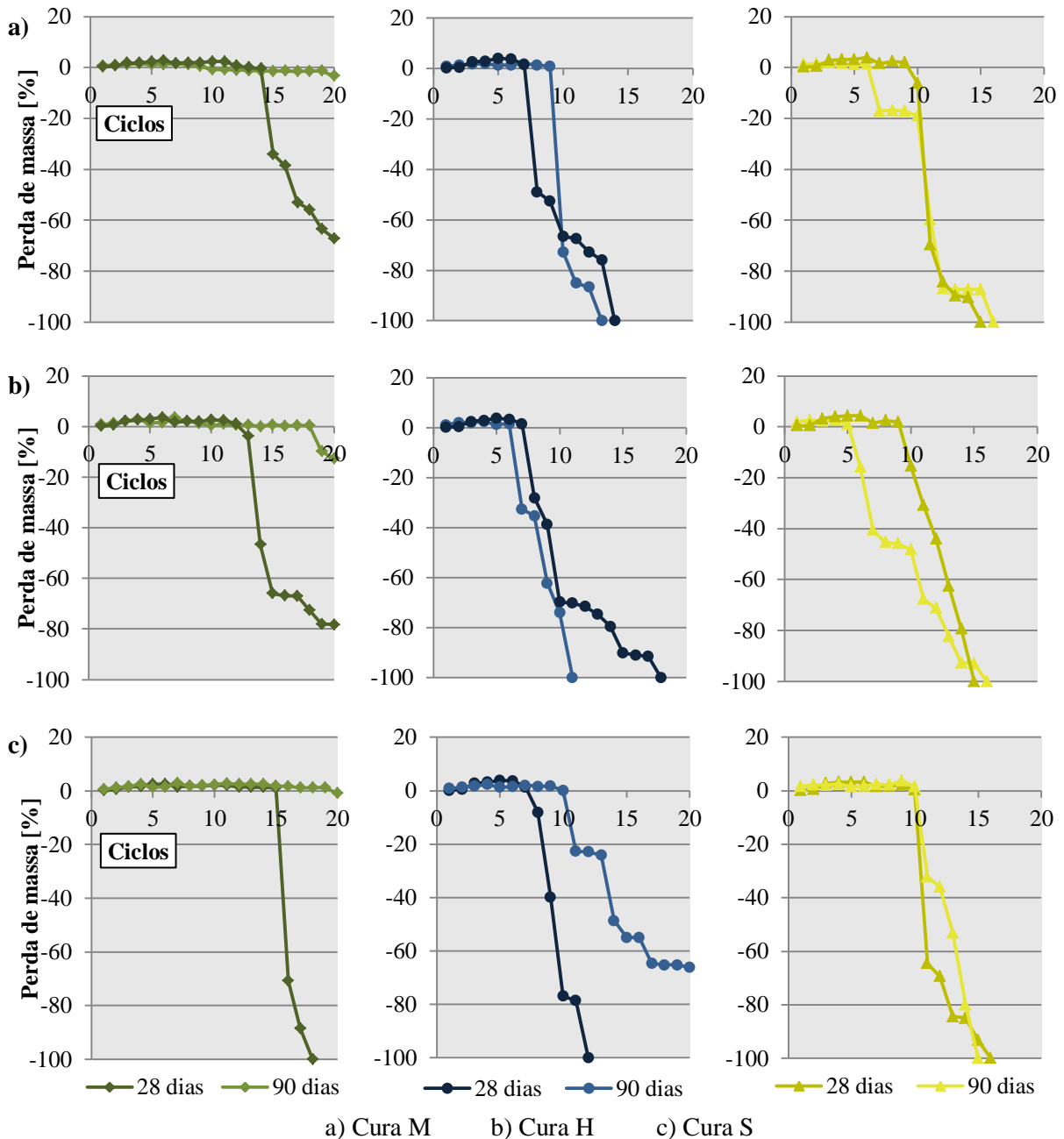


Figura 4.20 – Resistência aos sulfatos a todas as idades

Na Figura 4.21, apresentam-se as perdas de massa no 11º ciclo, que foi o ciclo passível a ser comparado entre todas as argamassas é balizado pela argamassa NHL_10Mk_H que, aos 90 dias, que

apresenta uma perda de massa de 100%. Nesta figura, e comparando diretamente as argamassas, é possível reforçar a ideia de que as argamassas NHL apresentam o melhor comportamento no ensaio estando no polo oposto as argamassas com metacaulino NHL_10Mk e NHL_20Mk com comportamento mais fraco destacando-se a argamassa NHL_10Mk com o pior comportamento das três. Enquanto as argamassas de NHL3.5 sem Mk aparentam vir a ter bom comportamento face ao ataque por sulfatos, já as argamassas com a mesma cal e Mk não surgem como apropriadas para aplicação quando este ataque está ou tem grande probabilidade de vir a estar presente.

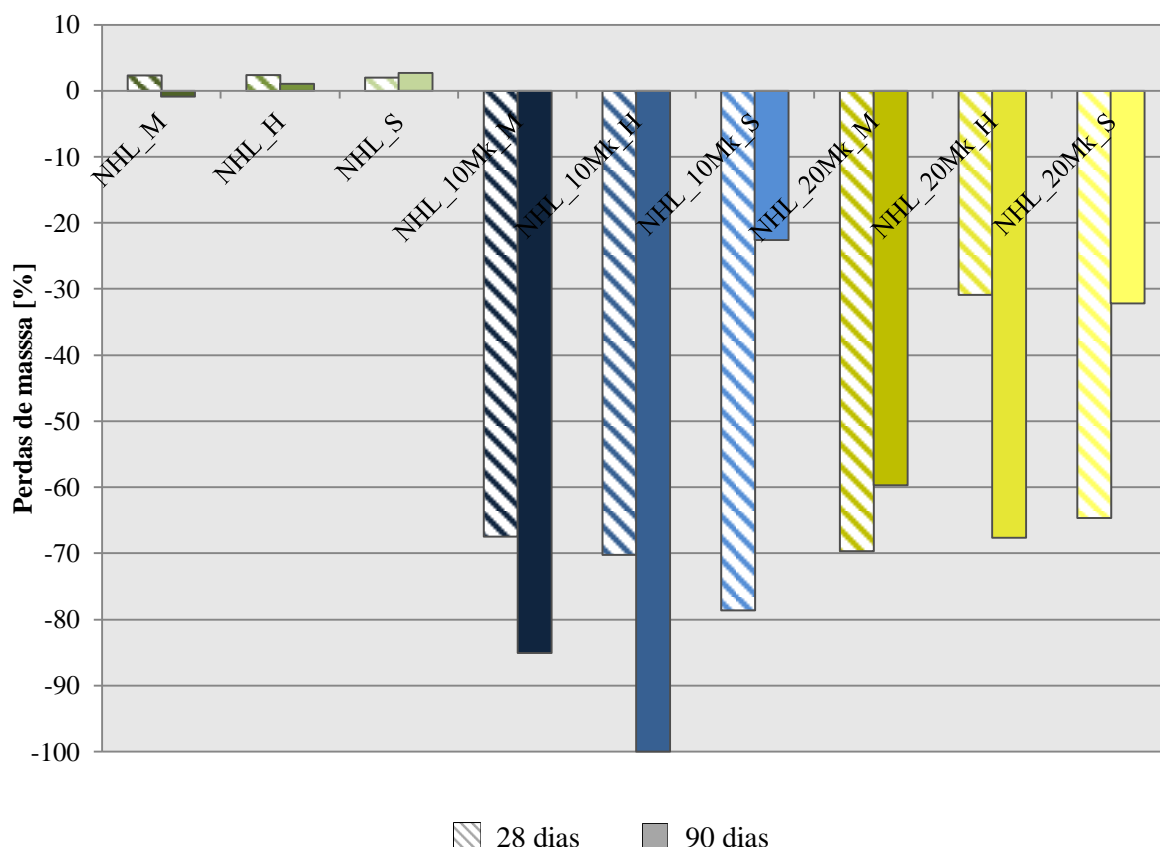


Figura 4.21 – Variações de massa de todas as argamassas aos 28 e 90 dias após o 11º ciclo

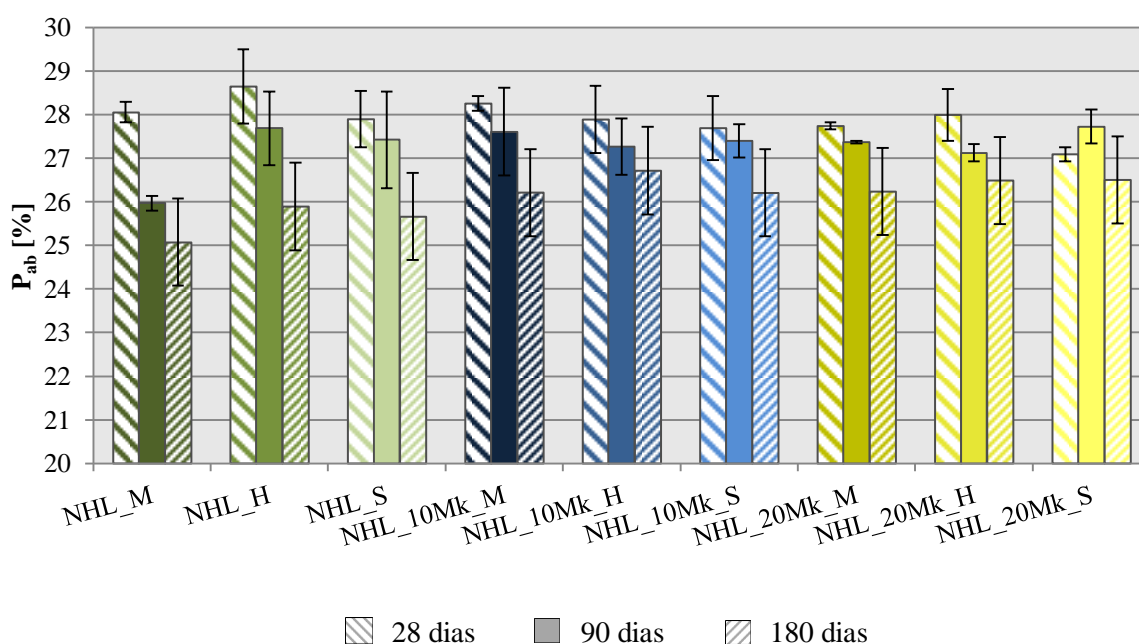
4.2.8 Porosidade e massa volúmica aparente, método hidrostático

No Quadro 4.8 podem ser consultados os valores médios e desvios padrão dos valores de porosidade aberta, P_{ab} , e massa volúmica aparente, MVA, de todas as argamassas em todas as curas aos 28, 90 e 180 dias. A Figura 4.22 regista a evolução dos valores de P_{ab} de todas as argamassas, enquanto na Figura 4.23 se regista a evolução dos valores de MVA. No anexo V (Tabela V.6 a V.8) podem ser consultados os valores individuais obtidos nas leituras efetuadas para cada provete de cada argamassa.

Quadro 4.8 – Valores médios e desvios padrão dos valores de porosidade aberta e massa volúmica aparente por método hidrostático

Argamassa	28 dias				90 dias				180 dias			
	MVA [kg/m ³]		P _{ab} [%]		MVA [kg/m ³]		P _{ab} [%]		MVA [kg/m ³]		P _{ab} [%]	
	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP	Méd	DP
NHL_M	1787	9	28,1	0,2	1821	11	26,0	0,2	1903	8	25,1	0,5
NHL_H	1762	19	28,7	0,9	1801	9	27,7	0,8	1902	12	25,9	1,3
NHL_S	1783	9	27,9	0,7	1802	26	27,4	1,1	1884	18	25,7	0,5
NHL_10Mk_M	1735	11	28,3	0,2	1776	27	27,6	1,0	1855	17	26,2	0,6
NHL_10Mk_H	1755	10	27,9	0,8	1763	15	27,3	0,6	1845	13	26,7	0,6
NHL_10Mk_S	1759	18	27,7	0,7	1780	7	27,4	0,4	1848	14	26,2	0,9
NHL_20Mk_M	1733	22	27,7	0,1	1761	16	27,4	0,0	1838	3	26,2	0,2
NHL_20Mk_H	1750	15	28,0	0,6	1772	7	27,1	0,2	1826	7	26,5	0,3
NHL_20Mk_S	1753	23	27,1	0,2	1761	10	27,7	0,4	1835	19	26,5	0,5

Nas Figura 4.22 e 4.23 pode ser consultada a evolução da P_{ab} e MVA em todas as argamassas a todas as idades. Uma análise geral da Figura 4.22 permite observar que com a idade todas as argamassas apresentam um decréscimo do seu valor de P_{ab} não se destacando nenhuma delas pelo seu maior ou menor valor em comparação com as restantes.

**Figura 4.22** – Porosidade aberta de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias

Analisando a Figura 4.23 observa-se o inverso do ocorrido na P_{ab}; no caso da MVA os valores têm uma evolução crescente com a idade; de destacar também os valores mais elevados das argamassas NHL, os mais baixos das argamassas NHL_20Mk e uma tendência para a diminuição ligeira da MVA da cura M para as curas H e S.

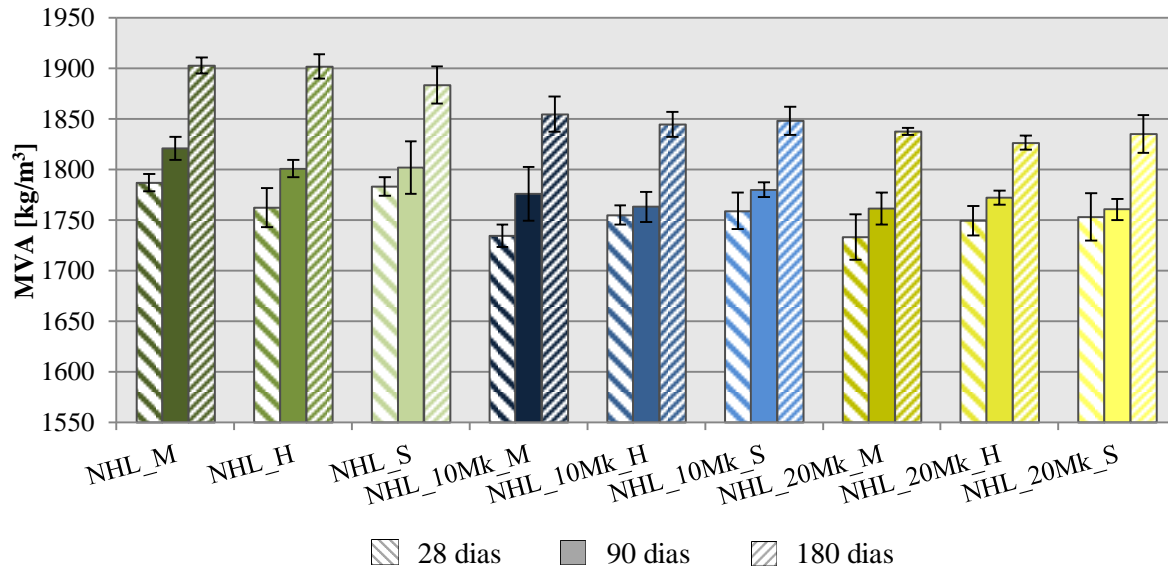


Figura 4.23 – Massa volúmica aparente de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias

Analisando a Figura 4.24 a todas as idades, e tomando como referência a argamassa sem Mk tem-se que:

- 28 dias (Figura 4.24a)

Os valores de MVA e os valores de P_{ab} têm uma evolução decrescente com o aumento da percentagem de metacaulino.

- 90 dias (Figura 4.24b)

A tendência mantém-se decrescente nos valores de MVA com o aumento da percentagem de metacaulino; na P_{ab} a evolução é crescente nas curas M e S com o aumento da percentagem de metacaulino e decrescente na cura H.

- 180 dias (Figura 4.24c)

A tendência foi semelhante à dos 28 dias com uma evolução decrescente dos valores de MVA com a percentagem de metacaulino mas crescente dos valores de P_{ab} com a percentagem de metacaulino.

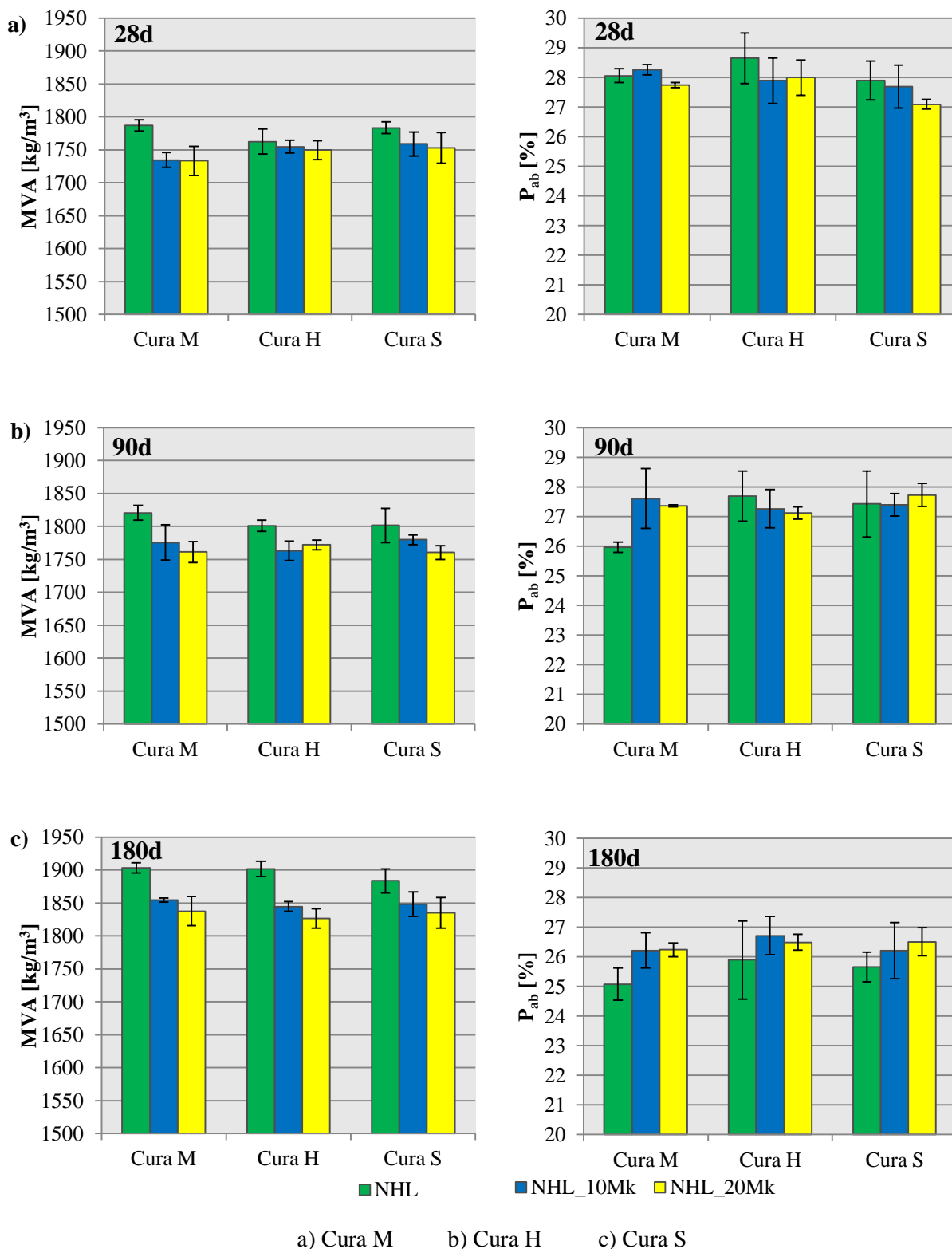


Figura 4.24 – Massa volúmica aparente e porosidade aberta de todas de todas as argamassas

4.2.9 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Contrariamente a todos os ensaios anteriores, e devido ao custo e morosidade do ensaio, esta análise efetuou-se apenas a uma amostra de cada argamassa/condição de cura.

- Porosidade aberta e massa volúmica aparente

A análise no porosímetro de mercúrio fornece também valores de porosidade aberta e massa volúmica aparente; o Quadro 4.9 regista esses valores referentes a cada argamassa, em cada cura, às três idades de ensaio.

Quadro 4.9 – Valores de porosidade aberta e massa volúmica aparente por porosimetria de mercúrio

Argamassa	28 dias		90 dias		180 dias	
	MVA [kg/m ³]	P _{ab} [%]	MVA [kg/m ³]	P _{ab} [%]	MVA [kg/m ³]	P _{ab} [%]
NHL_M	1816	27,7	1880	25,9	2026	26,8
NHL_H	1800	27,7	1843	26,7	1968	24,9
NHL_S	1841	27,4	1845	26,4	1953	28,7
NHL_10Mk_M	1805	28,1	1763	23,0	1900	27,4
NHL_10Mk_H	1790	27,7	1852	25,8	1894	29,6
NHL_10Mk_S	1792	26,9	1833	25,9	1899	27,6
NHL_20Mk_M	1826	26,3	1808	26,2	1945	29,8
NHL_20Mk_H	1804	27,8	1793	27,3	1831	28,1
NHL_20Mk_S	1811	27,7	1777	27,2	1877	29,7

Nas Figura 4.25 e 4.26 pode ser consultada a evolução da P_{ab} e MVA em todas as argamassas a todas as idades. Uma análise geral da Figura 4.25 permite observar que, aos 90 dias, todas as argamassas apresentam um decréscimo do valor apresentado aos 28 dias, e que, aos 180 dias, todas as argamassas (à exceção da NHL_H) têm um aumento do seu valor de P_{ab}.

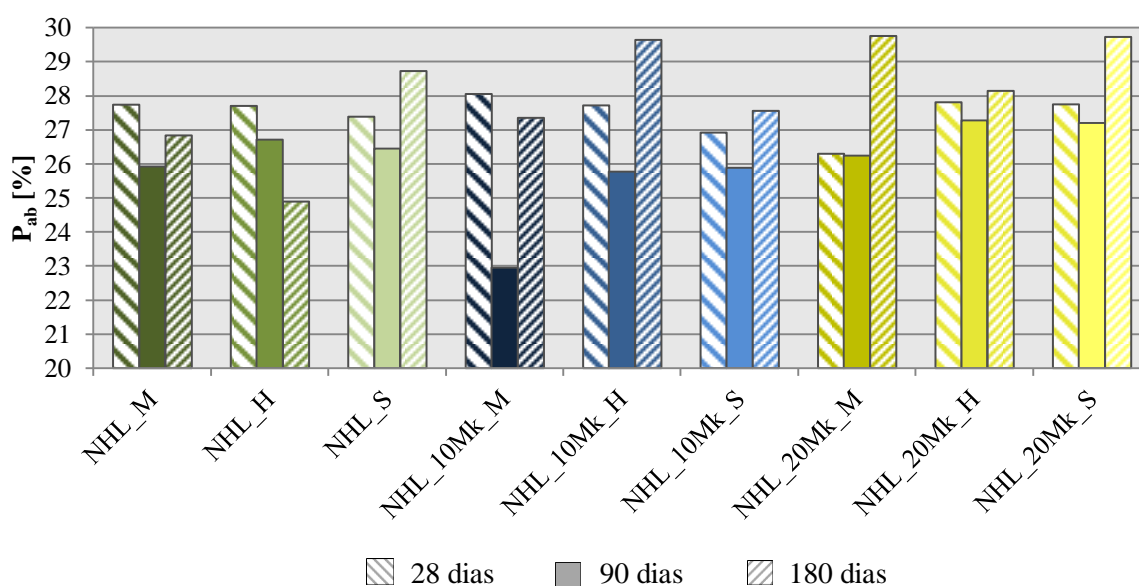


Figura 4.25 – Porosidade aberta por porosimetria de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias

Analisando a Figura 4.26 é possível observar uma evolução crescente dos valores de MVA de todas as argamassas. De assinalar os maiores valores de MVA das argamassas NHL, em todas as curas, e os menores na cura H e S das argamassas NHL_20Mk e na cura M da NHL_10Mk.

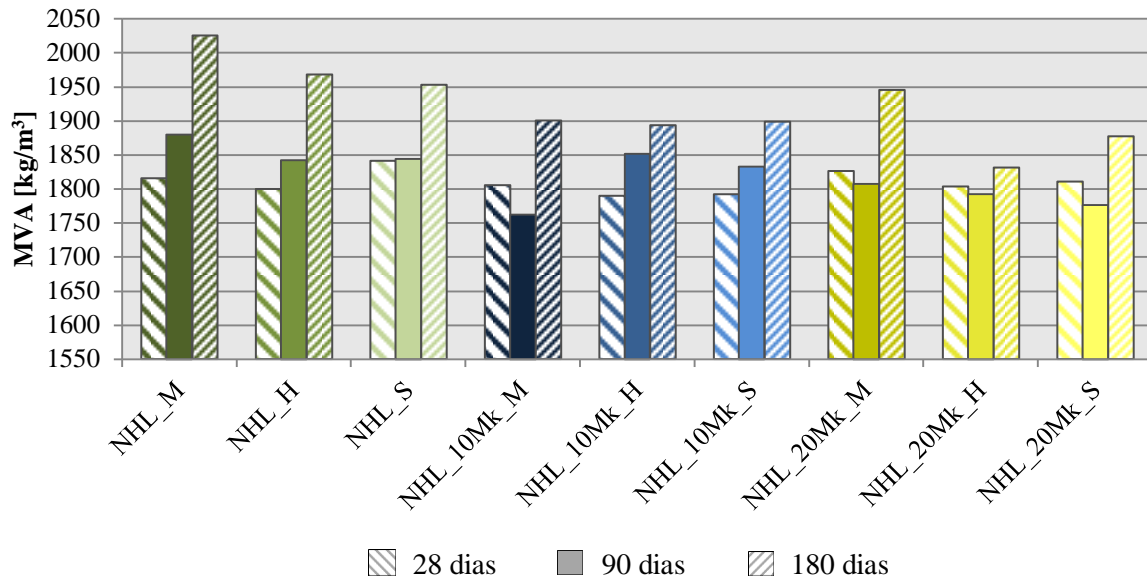
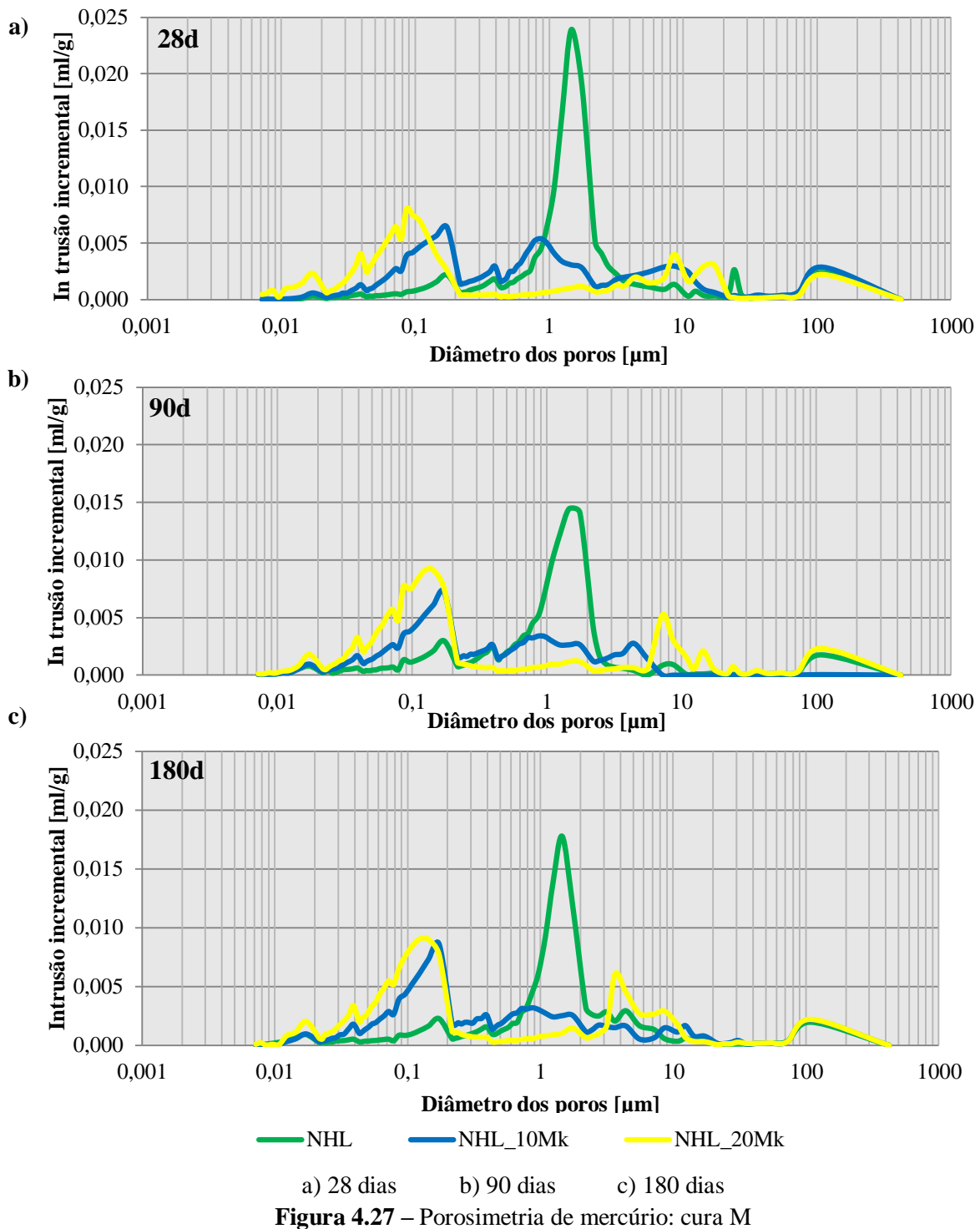


Figura 4.26 – Massa volúmica aparente por porosimetria de todas as argamassas aos 28, 90 e 180 dias

- Distribuição de poros

A análise por porosimetria de mercúrio permitiu obter informação sobre a distribuição do tamanho dos poros de cada lote de argamassa e a sua evolução com a idade. Os dados registados pelo porosímetro permitiram traçar gráficos de abcissas logarítmicas, que possibilitam observar essa evolução com as percentagens de metacaulino, cura e idade.

A Figura 4.27 ilustra a evolução da distribuição dos poros com a percentagem de metacaulino nas três idades na cura M. Na argamassa NHL a maioria dos poros apresenta tamanhos entre 1 e 2 μ m, não sofrendo quaisquer alterações com a idade. A argamassa NHL_10Mk apresenta aos 28 dias dois tamanhos de poros principais, 0,2 e 0,8 μ m; com o evoluir da idade os poros de 0,8 μ m deixam de existir, permanecendo apenas os de 0,2 μ m. Na argamassa NHL_20Mk aos 28 dias os poros têm principalmente o tamanho de 0,1 μ m; aos 90 dias ocorre um pico aos 7 μ m, e outro entre os 1 e 2 μ m; Aos 180 dias permanece o pico entre os 1 e 2 μ m alterando-se o pico dos 7 μ m para os 4.



A Figura 4.28 ilustra a evolução da distribuição dos poros com a percentagem de metacaulino nas três idades na cura H. Na argamassa NHL a maioria dos poros apresenta também tamanhos entre 1 e 2 μm ; a argamassa NHL_10Mk apresenta aos 28 dias poros de tamanho entre 0,1 e 0,2; na argamassa NHL_20Mk aos 28 dias os poros têm o tamanho entre 0,1 e 0,2 μm não sofrendo também quaisquer alterações com a idade. Nenhuma das argamassas na cura H sofre alterações do tamanho dos poros com a idade.

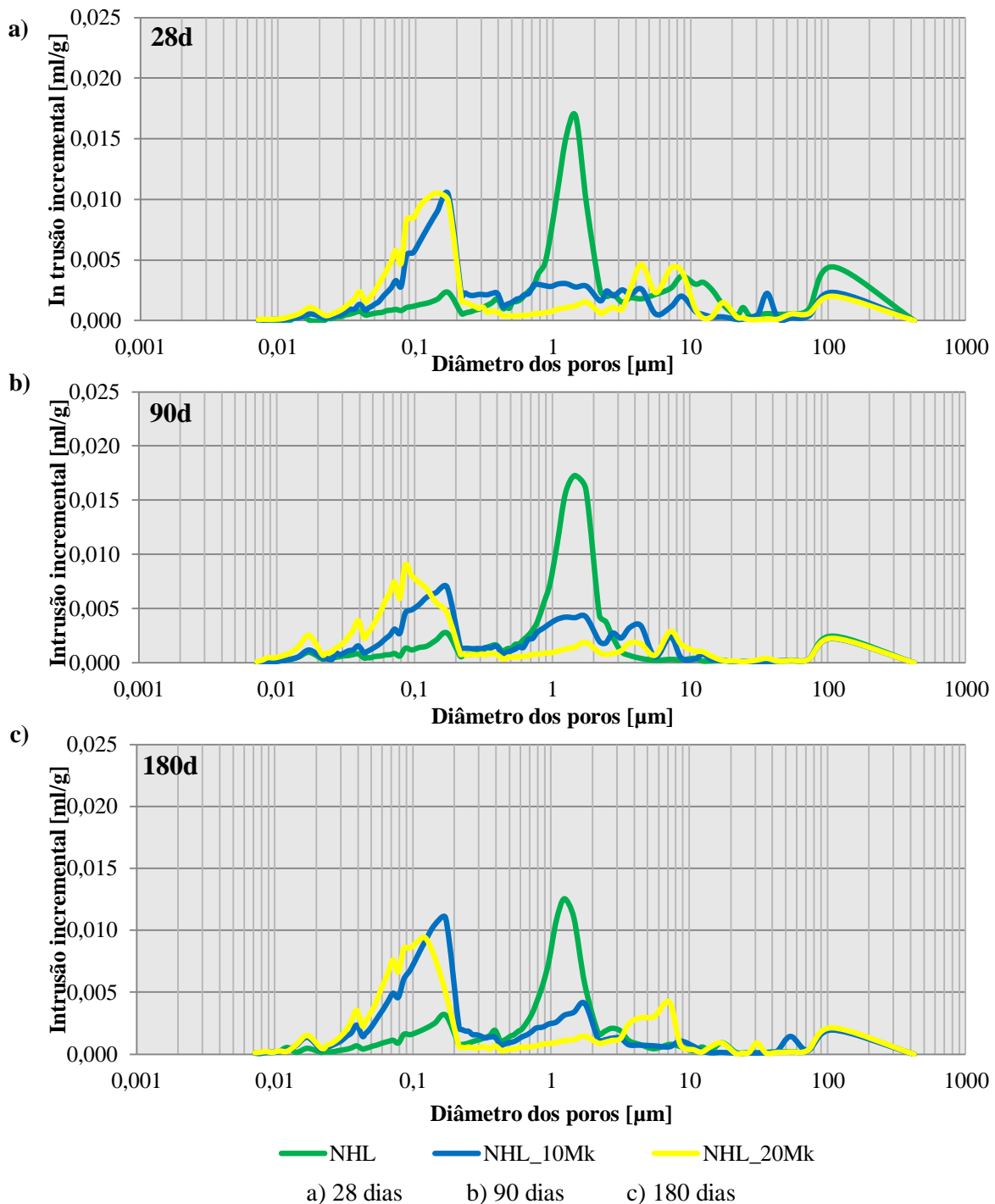


Figura 4.28 – Porosimetria de mercúrio: cura H

A Figura 4.29 ilustra a evolução da distribuição dos poros com a percentagem de metacaulino nas três idades na cura S. Na argamassa NHL a maioria dos poros apresenta tamanhos entre 1 e 2 μm ; a argamassa NHL_10Mk apresenta aos 28 dias poros de tamanhos entre 0,1 e 0,2 μm ; na argamassa NHL_20Mk aos 28 dias os poros têm o tamanho entre 0,1 e 0,2 μm . Nenhuma das argamassas na cura S sofre alterações do tamanho dos poros com a idade

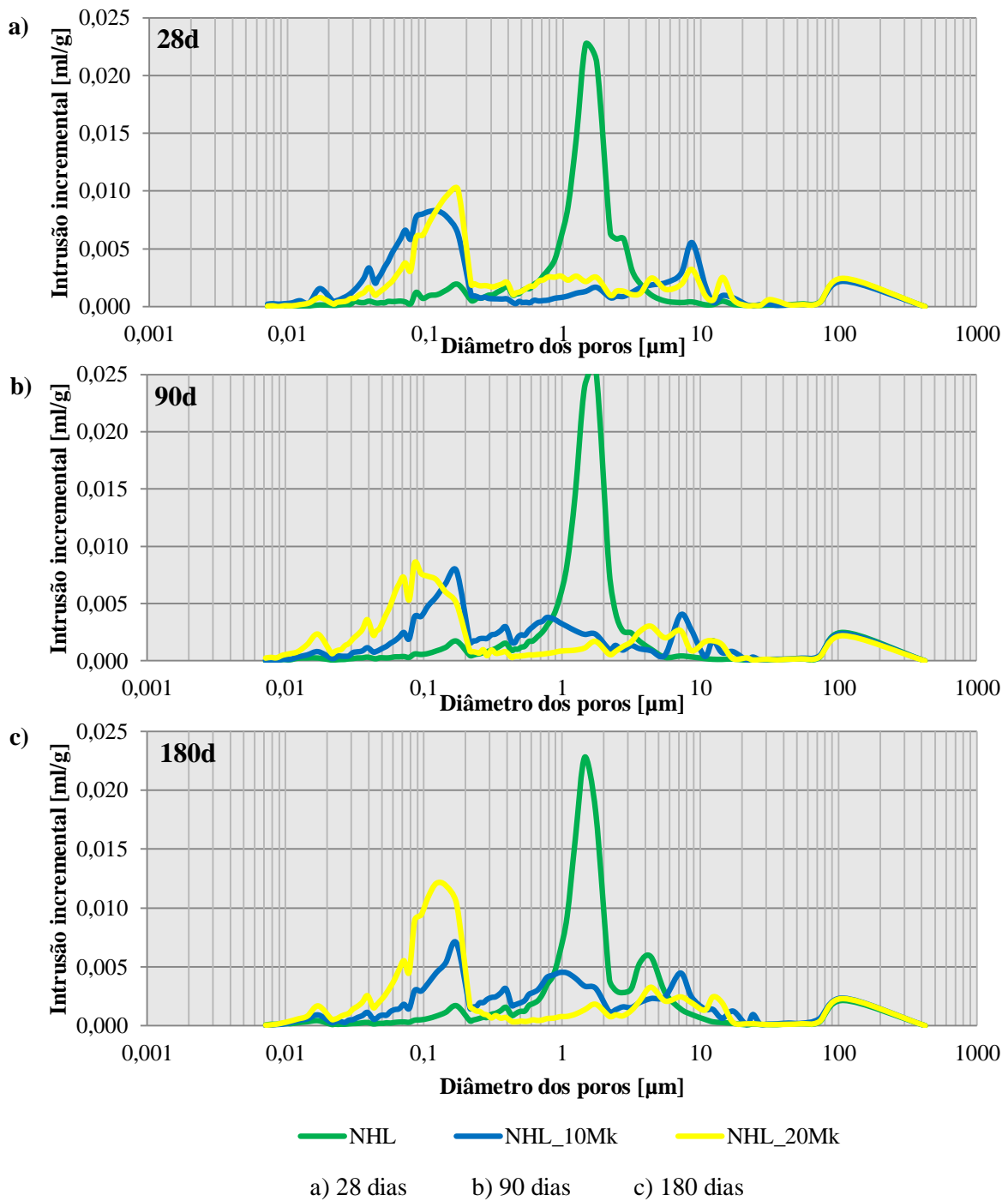


Figura 4.29 – Porosimetria de mercúrio: cura S

4.2.10 Caracterização química, mineralógica e microestrutural

- Análise XRD

Na análise XRD, o resultado é expresso num difratograma, que apresenta um espetro com picos característicos dos compostos cristalinos existentes.

No Quadro 4.10 apresentam-se os principais compostos cristalinos identificados por XRD nas amostras de cada argamassa. Esses compostos foram designados com uma letra específica, notação que foi utilizada nos difratogramas – Figura 4.34 a 4.36.

Quadro 4.10 – Identificação de compostos cristalinos e notação empregue nos difratogramas das amostras

Composto	Fórmula química	Notação
Etringite	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$	E
Monocarboaluminato	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CO}_2\cdot 11\text{H}_2\text{O}$	M
Hidrocalumite	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 13\text{H}_2\text{O}$	Hc
Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	P
Quartzo	SiO_2	Q
Belite	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	L
Calcite	CaCO_3	C
Vaterite	CaCO_3	V
Tenardite	Na_2SO_4	T
Moscovite	$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Mt
Anatase	TiO_2	A
Feldspato potássico	KAlSi_3O_8	F

Nas Figura 4.30 a 4.32 apresentam-se os difratogramas dos materiais utilizados neste trabalho (cal NHL3.5, Mk Argical e mistura de areias siliciosas). Da análise dos difratogramas dos materiais pode concluir-se o seguinte:

- A **cal NHL3.5** é constituída por portlandite e calcite, que são os compostos em maior proporção, e ainda belite e quartzo.
- O **Mk** apresenta uma banda entre cerca de 20 e 40°2θ que traduz a existência de material amorfo, material esse responsável pela reatividade pozolânica. Identificam-se ainda os minerais quartzo, moscovite e anatase que se atribuem a impurezas da matéria-prima.
- A **mistura de areias siliciosas** é constituída essencialmente por quartzo e, ainda algum feldspato do tipo potássico.

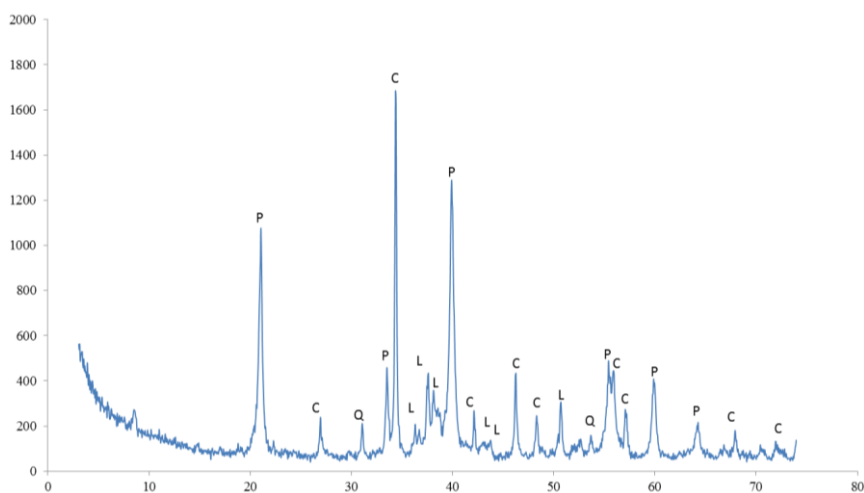


Figura 4.30 – Difratograma da cal NHL3.5

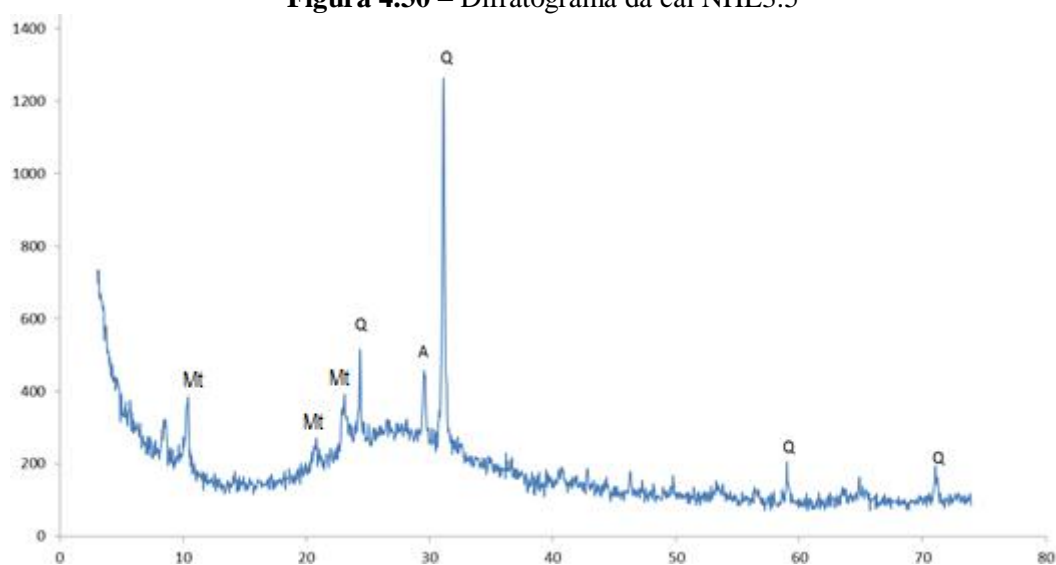


Figura 4.31 – Difratograma do Mk

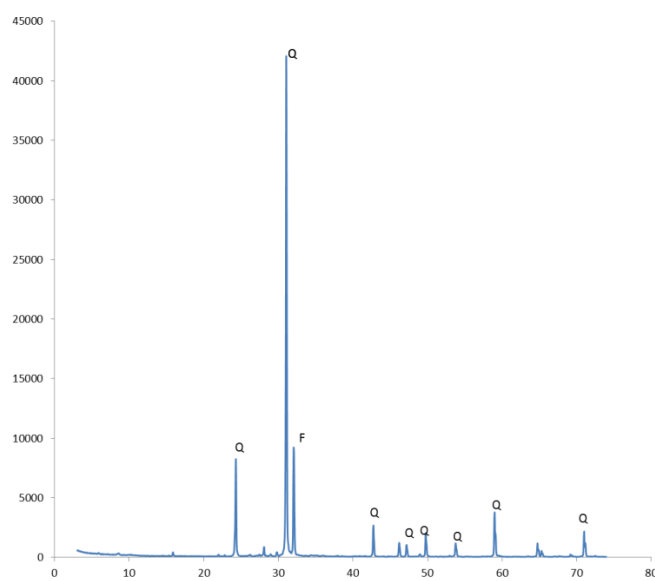


Figura 4.32 – Difratograma da mistura de areias

Na Figura 4.33 apresentam-se os difratogramas das argamassas NHL, NHL_10Mk e NHL_20Mk relativamente à cura M para as idades de 28, 90 e 180 dias, e no Quadro 4.11 a composição mineralógica qualitativa obtida.

Verifica-se que o composto cristalino presente em maior proporção é a calcite. Este dado, associado à fraca proporção de compostos hidratados (monocarboaluminato de cálcio hidratado, hidrocalumite e etringite) indicia que a reação de carbonatação foi dominante sobre as reações de hidratação e pozolânica. Verifica-se para as argamassas da cura marítima, e ao contrário do espectável, a inexistência de sais com elementos químicos associados ao ambiente marítimo (nomeadamente cloretos e sulfatos).

Constata-se que a reação de carbonatação evolui ao longo do tempo, o que é confirmado pelas proporções de portlandite e de calcite. Esta evolução na reação de carbonatação é também acompanhada por uma evolução na reação de hidratação, já que a belite não se deteta a partir dos 90 dias.

De assinalar que o monocarboaluminto e a hidrocalumite apresentam um comportamento instável ao longo do tempo, facto que é conhecido da literatura [GAMEIRO *et al.*, 2012] e que se atribui à presença de portlandite livre no sistema.

Em termos do efeito do metacaulino verifica-se que nas argamassas NHL_20Mk aos 28 dias já praticamente não se deteta portlandite, o que indica que a reação pozolânica já ocorreu, para esta argamassa, quase na sua totalidade. Comparativamente à argamassa NHL_10Mk verifica-se que a reação pozolânica foi mais lenta, atingindo o seu máximo à idade de 90 dias, que é a idade em que praticamente já não se deteta portlandite.

Um outro dado que é de registar é que com o aumento da idade deteta-se a presença de vaterite, composto esse que traduz fenómenos de dissolução/cristalização em resultado da ação da água. A vaterite existe em maior proporção nas argamassas com metacaulino e à idade de 180 dias.

Quadro 4.11 – Resultados da análise por XRD, cura M

Argamassa	NHL_M			NHL_10Mk_M			NHL_20Mk_M		
	28d	90d	180d	28d	90d	180d	28d	90d	180d
Calcite	+++	+++/++++	+++/++++	+++	+++/++++	+++/++++	+++	+++/++++	++/+++
Portlandite	+ / ++	+	-	+	vtg	-	-	?	-
Monocarboaluminato	vtg	-	-	+	vtg/+	vtg	vtg/+	vtg	vtg/+
Hidrocalumite	vtg	-	-	vtg	-	-	vtg/+	vtg/+	-
Belite	+	vtg	-	vtg	vtg	-	vtg	?	?
Quartzo	vtg	+	+	+ / ++	+ / ++	+	+	++	+
Etringite	vtg/+	vtg	?	vtg	?	?	?	?	?
Vaterite	-	-	-	?	vtg	?	+	+ / ++	+ / ++
Tenardite	-								

Notação: ++++ – composto predominante; +++ – proporção elevada; ++ – proporção média
+ – existe em fraca proporção; vtg – vestígios; - - não detectado; ? – Dúvidas na presença

Na Figura 4.34 e Quadro 4.12 apresentam-se os difratogramas das argamassas da cura H.

Em termos qualitativos constata-se uma grande semelhança na composição mineralógica entre as argamassas em cura H e cura M. Apenas há a salientar uma maior proporção de vaterite nas argamassas com Mk e para as idades de 90 e 180 dias, facto que se explica pela maior ação da água, já que as argamassas em cura H estiveram sempre na presença de HR > 95%.

Quadro 4.12 – Resultados da análise por XRD, cura H

Argamassa	NHL_H			NHL_10Mk_H			NHL_20Mk_H		
	28d	90d	180d	28d	90d	180d	28d	90d	180d
Calcite	++/+++	+++	+++/++++	+++	+++	+++/++++	++/+++	+++	+++/++++
Portlandite	++	+ / ++	+	+	vtg/+	vtg	vtg	?	?
Monocarboaluminato	vtg	vtg	vtg	+	vtg/+	vtg/+	+	vtg/+	vtg/+
Hidrocalumite	vtg	vtg	vtg	vtg/+	vtg	vtg	vtg/+	vtg	vtg
Belite	+	vtg	vtg	+	vtg	vtg	vtg	?	?
Quartzo	+	+ / ++	+	+	+ / ++	+	+ / ++	++	+
Etringite	vtg/+	vtg	vtg	vtg	?	?	?	?	?
Vaterite	-	-	-	vtg	+	+ / ++	+	+ / ++	++
Tenardite	-								

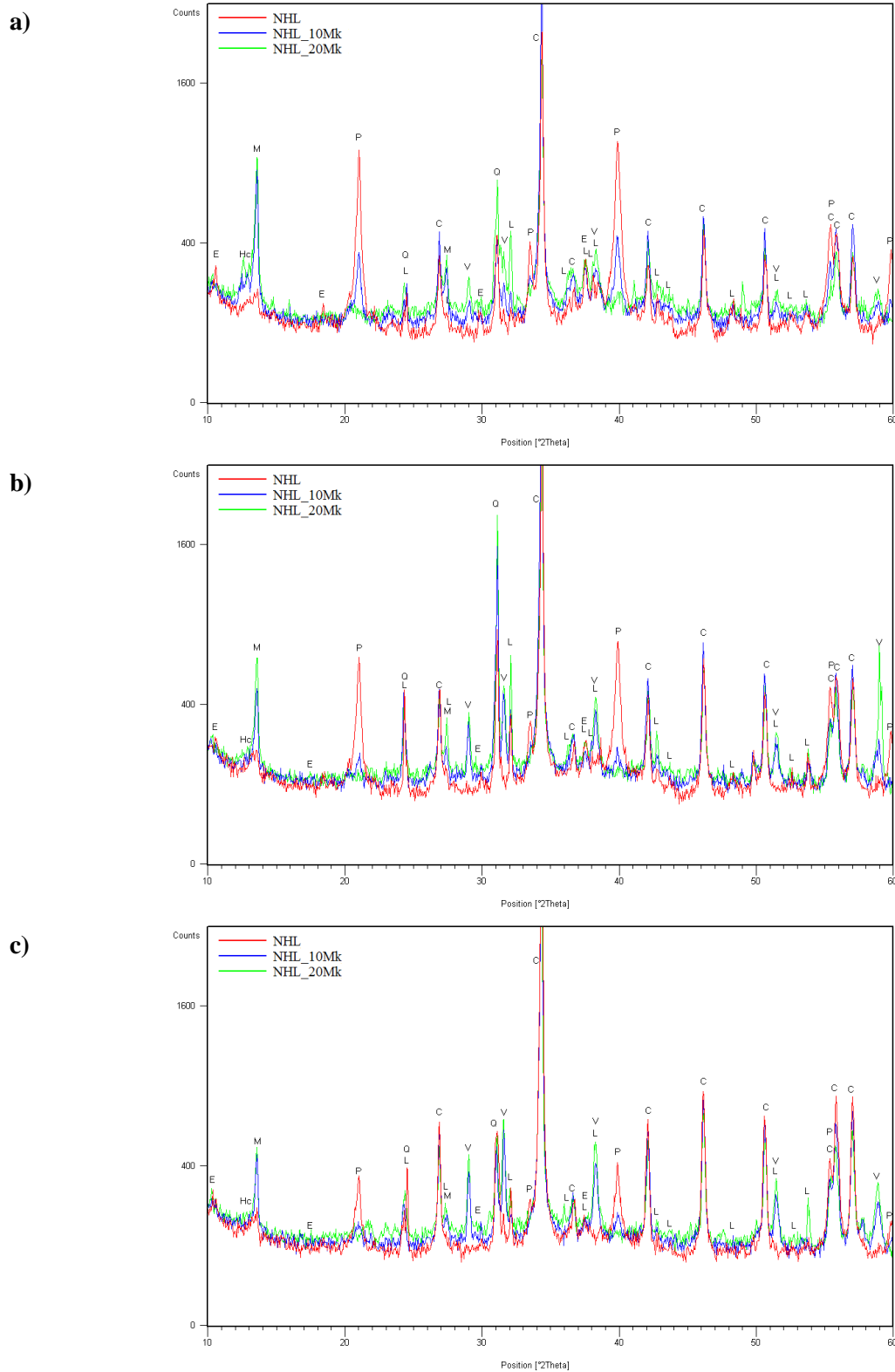
Notação: ++++ – composto predominante; +++ – proporção elevada; ++ – proporção média
+ – existe em fraca proporção; vtg – vestígios; - - não detectado; ? – Dúvidas na presença

Na Figura 4.35 e Quadro 4.13 apresentam-se os resultados da análise XRD das argamassas em cura S. Como se constata os resultados da composição mineralógica são também semelhantes aos das argamassas das curas M e H embora a velocidade de hidratação da belite tenha sido menor nesta condição de cura (o que justifica as menores resistências mecânicas).

Quadro 4.13 – Resultados da análise por XRD, cura S

Argamassa	NHL_S			NHL_10Mk_S			NHL_20Mk_S		
	28d	90d	180d	28d	90d	180d	28d	90d	180d
Calcite	+++	+++/++++	+++/++++	+++	+++/++++	+++/++++	+++	+++	+++
Portlandite	++	+	+	+	vtg	?	-	-	?
Monocarboaluminato	vtg	-	-	vtg/+	vtg/+	vtg	+	vtg/+	vtg/+
Hidrocalumite	vtg	-	-	vtg	-	-	vtg/+	vtg/+	?
Belite	+	vtg/+	vtg	vtg	vtg	vtg	vtg	vtg	?
Quartzo	+	+ / ++	+ / ++	+	++	+	+ / ++	+ / ++	+
Etringite	vtg	?	?	?	?	?	?	?	?
Vaterite	-	-	-	+	+	+ / ++	+ / ++	+ / ++	+ / ++
Tenardite	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Notação: ++++ – composto predominante; +++ – proporção elevada; ++ – proporção média
+ – existe em fraca proporção; vtg – vestígios; - - não detectado; ? – Dúvidas na presença



a) 28 dias b) 90 dias c) 180 dias

Figura 4.34 – Difractogramas das argamassas da cura H

- *Análise termogravimétrica (TGA) e análise térmica diferencial (DTA)*

Nas figuras Figura 4.36 e 4.37 apresentam-se as curvas dTG de todas as argamassas nas curas M, H e S aos 28, 90 e 180 dias. A repetição das curvas dTG da cura H na Figura 4.37 é propositada com o intuito de haver um padrão de comparação com a cura S.

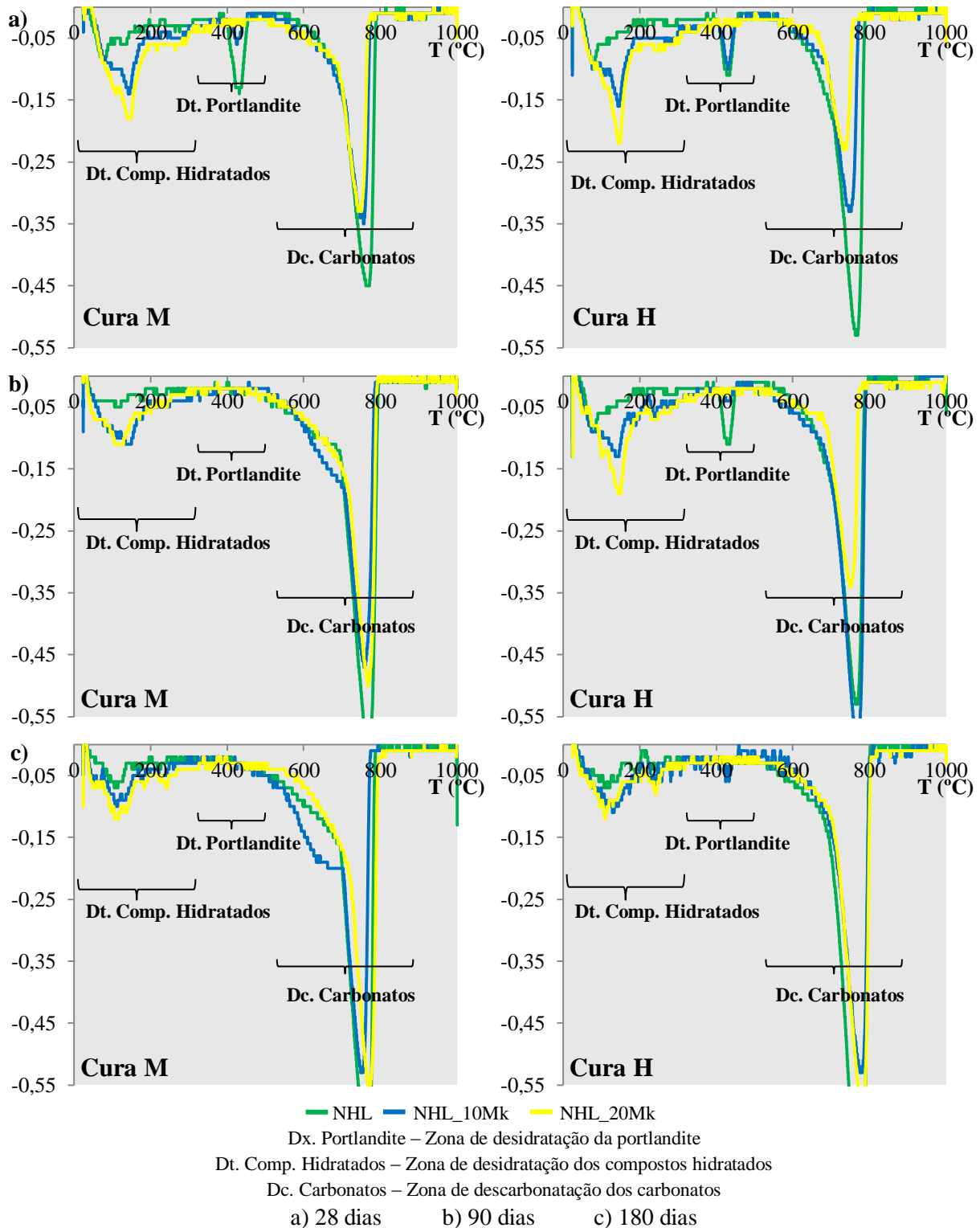


Figura 4.36 – Curvas dTG de todas as argamassas da cura H e M

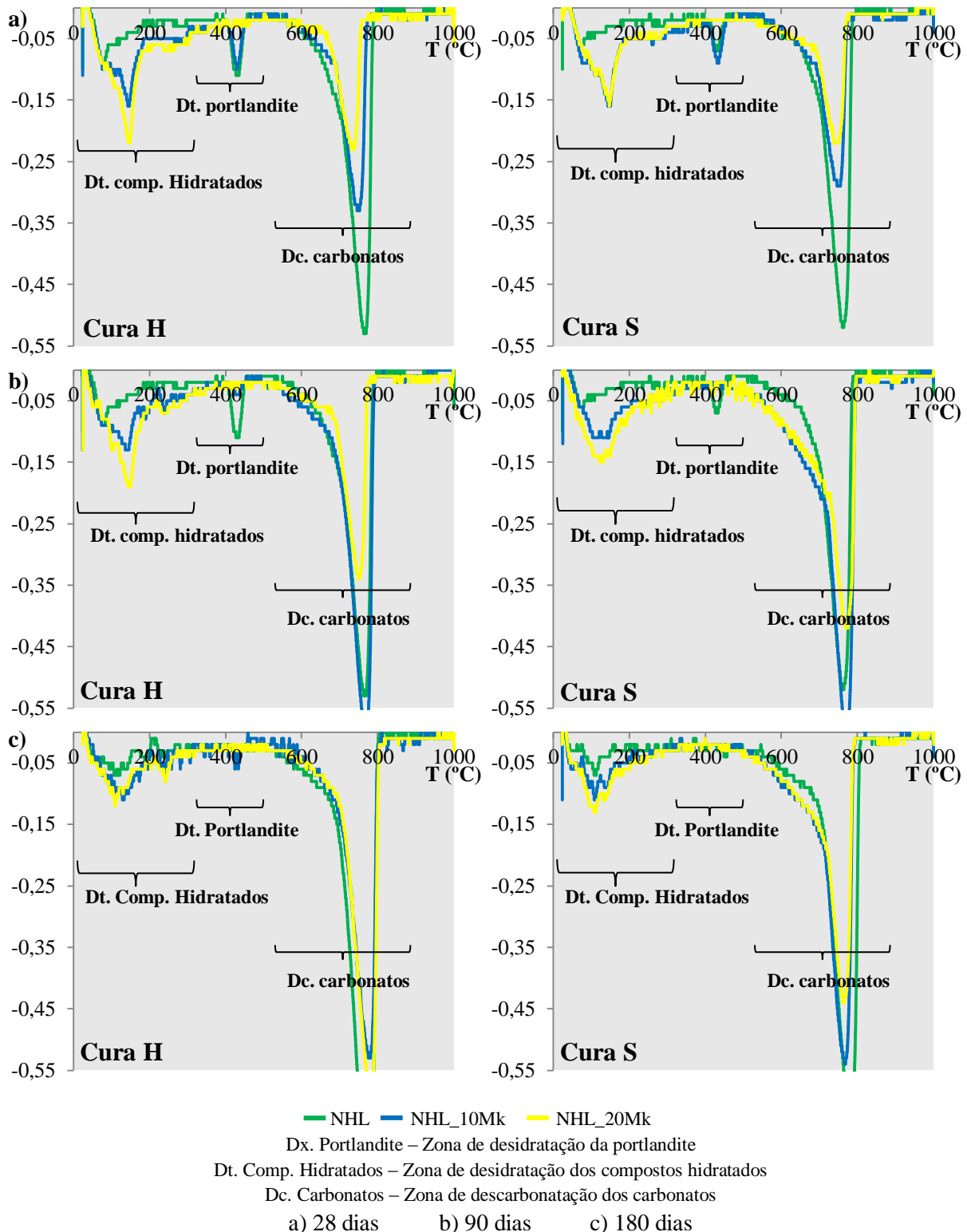


Figura 4.37 – Curvas dTG de todas as argamassas da cura H e S

Da análise das curvas dTG obtidas verifica-se a presença de três gamas de temperatura onde ocorrem perdas de massa (pm) que, de acordo com a análise XRD, se atribuem a:

- **temperatura ambiente a cerca de 380°C** – Zona de perda de massa devida à desidratação dos compostos hidratados (monocarboaluminato, hidrocalumite e etringite).
- **380°C a 500°C** – Zona de perda devida à desidratação da portlandite.

- 500°C a 850°C – Zona de perda de massa devida à descarbonatação dos carbonatos (calcite, vaterite e carboaluminato).

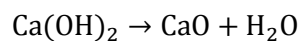
No Quadro 4.14 apresentam-se as perdas de massa nos intervalos das três gamas de temperatura, onde ocorrem perdas de massa, de todas as argamassas às idades de 28, 90 e 180 dias.

Quadro 4.14 – Perdas de massa nas três gamas de temperatura

Amostras	Perda de massa [%]								
	T _{ambiente} -380°C			380-500°C			500-850°C		
	28 d	90 d	180 d	28 d	90 d	180 d	28 d	90 d	180 d
<i>NHL_M</i>	1,07	0,84	0,99	0,57	0,28	0,39	3,63	5,41	6,07
<i>NHL_10Mk_M</i>	1,67	1,63	1,36	0,28	0,24	0,41	3,00	4,61	5,53
<i>NHL_20Mk_M</i>	2,19	1,50	1,73	0,28	0,29	0,37	2,80	4,40	4,94
<i>NHL_H</i>	1,01	1,21	1,03	0,44	0,46	0,30	4,23	5,45	6,29
<i>NHL_10Mk_H</i>	1,87	1,77	1,50	0,42	0,27	0,27	2,67	4,83	4,52
<i>NHL_20Mk_H</i>	2,28	2,17	1,61	0,28	0,28	0,30	1,88	2,80	4,83
<i>NHL_S</i>	0,81	0,85	0,84	0,28	0,28	0,30	4,05	5,84	5,41
<i>NHL_10Mk_S</i>	1,85	1,68	1,34	0,40	0,31	0,25	2,51	5,62	4,85
<i>NHL_20Mk_S</i>	1,71	2,09	1,63	0,23	0,29	0,30	2,07	4,54	4,26

Com base nas perdas de massa obtida, nas correspondentes reações químicas e correlações molares dos compostos envolvidos nessas reações, é possível obter as percentagens de cal (Ca(OH)₂) consumida nas reações de carbonatação e pozolânica e ainda a cal (Ca(OH)₂) livre por reagir, Quadro 4.15 e Figura 4.38.

Assim, a partir da perda de massa no intervalo de temperatura 380-500°C, correspondente à reação de desidratação da portlandite:

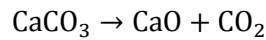


é possível calcular o teor de Ca(OH)₂ livre na amostra, equação 4.1:

$$\text{teor}_{\text{livre}} [\text{Ca(OH)}_2] = \text{pm}_{380-500^\circ\text{C}} \times \frac{M_{\text{Ca(OH)}_2}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (\text{equação 4.1})$$

onde $\text{pm}_{380-500^\circ\text{C}}$ corresponde à perda de massa de H₂O no intervalo 380-500°C e a relação $\frac{M_{\text{Ca(OH)}_2}}{M_{\text{H}_2\text{O}}}$ é a relação molar entre os dois compostos.

A partir da perda de massa obtida no intervalo de temperatura 500-850°C, correspondente à reação de descarbonatação dos carbonatos:

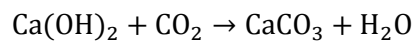


é possível determinar o teor de CaCO_3 na amostra, equação 4.2:

$$\text{teor} [\text{CaCO}_3] = \text{pm}_{500-850^\circ\text{C}} \times \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CO}_2}} \quad (\text{equação 4.2})$$

onde $\text{pm}_{500-850^\circ\text{C}}$ corresponde à perda de massa de CO_2 no intervalo $500-850^\circ\text{C}$ e relação $\frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CO}_2}}$ é a relação molar entre os dois compostos.

Com a reação de carbonatação do Ca(OH)_2 :



e o teor de carbonatos, é possível calcular o teor total de Ca(OH)_2 consumido na reação de carbonatação, equação 4.3:

$$\text{teor}_{\text{r.carbonatação}}^{\text{consumido}} [\text{Ca(OH)}_2] = \text{teor} [\text{CaCO}_3] \times \frac{M_{\text{Ca(OH)}_2}}{M_{\text{CaCO}_3}} \quad (\text{equação 4.3})$$

Tendo então os valores necessários é possível determinar o teor de cal total presente na amostra, equação 4.4:

$$\text{teor}_{\text{presente}} [\text{Ca(OH)}_2] = \text{teor}_{\text{r.carbonatação}}^{\text{consumido}} [\text{Ca(OH)}_2] + \text{teor}_{\text{livre}} [\text{Ca(OH)}_2] \quad (\text{equação 4.4})$$

Por fim, para obter os teores relativos de Ca(OH)_2 livre e consumido usam-se as expressões 4.5 e 4.6 respetivamente:

$$\text{teor}_{\text{r.carbonatação}}^{\text{relativo consumido}} [\text{Ca(OH)}_2] = \frac{\text{teor}_{\text{r.carbonatação}}^{\text{consumido}} [\text{Ca(OH)}_2]}{\text{teor}_{\text{presente}} [\text{Ca(OH)}_2]} \times 100 \quad (\text{equação 4.5})$$

$$\text{teor}_{\text{livre}}^{\text{relativo}} [\text{Ca(OH)}_2] = 100 - \text{teor}_{\text{consumido}}^{\text{relativo}} [\text{Ca(OH)}_2] \quad (\text{equação 4.6})$$

Para o caso das argamassas com Mk há ainda que ter em conta que o Ca(OH)_2 não é apenas consumido na reação de carbonatação mas também na reação pozolânica; para tal há que considerar a contribuição do consumo de Ca(OH)_2 nessa reação. Desconhecendo-se o teor de Ca(OH)_2 presente nas argamassas de NHL com introdução de Mk, considerou-se que esse teor seria igual ao da argamassa NHL à mesma idade e cura mas diluído do valor de substituição de Mk.

Assim para as argamassas com Mk esse valor é dado pela equação 4.7:

$$\text{teor}_{\text{presente}}^{\text{teórico}} [\text{Ca(OH)}_2] = \text{teor}_{\text{na NHL da cura e idade correspondente}}^{\text{presente}} [\text{Ca(OH)}_2] \times (1 - \% \text{Mk})$$

(equação 4.7)

O valor de Ca(OH)_2 consumida na reação pozolânica com o Mk foi então determinado pela equação 4.8:

$$\text{teor}_{\text{r.pozolância}}^{\text{consumido}} [\text{Ca(OH)}_2] = \text{teor}_{\text{presente}}^{\text{teórico}} [\text{Ca(OH)}_2] - \text{teor}_{\text{presente}} [\text{Ca(OH)}_2]$$

(equação 4.8)

Com base nas expressões 4.5, 4.6 e 4.9 determinaram-se os teores relativos de cal consumida em cada uma das reações intervenientes e que se apresentam no Quadro 4.15 e Figura 4.38, com a diferença de na equação 4.5 se usar $\text{teor}_{\text{presente}}^{\text{teórico}} [\text{Ca(OH)}_2]$ ao invés do $\text{teor}_{\text{presente}} [\text{Ca(OH)}_2]$. Para obter o teor relativo consumido na reação pozolânica usa-se a equação 4.9:

$$\text{teor}_{\text{r.pozolância}}^{\text{relativo consumido}} [\text{Ca(OH)}_2] = \frac{\text{teor}_{\text{r.pozolância}}^{\text{consumido}} [\text{Ca(OH)}_2]}{\text{teor}_{\text{presente}}^{\text{teórico}} [\text{Ca(OH)}_2]} \times 100$$

(equação 4.9)

- Exemplo de cálculo para argamassa NHL_M aos 28 dias

Cálculo o teor de Ca(OH)_2 livre na amostra:

$$\text{teor}_{\text{livre}} [\text{Ca(OH)}_2] = \text{pm}_{380-500^\circ\text{C}} \times \frac{M_{\text{Ca(OH)}_2}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = 0,57 \times \frac{74}{18} = 2,34\%$$

$$M_{\text{Ca(OH)}_2} = M_{\text{Ca}} + 2 \times M_{\text{O}} + 2 \times M_{\text{H}} = 40 + 2 \times 16 + 2 \times 2 = 74\text{g/mol}$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = M_{\text{O}} + 2 \times M_{\text{H}} = 16 + 2 \times 1 = 18\text{g/mol}$$

Cálculo teor de CaCO_3 na amostra:

$$\text{teor} [\text{CaCO}_3] = \text{pm}_{500-850^\circ\text{C}} \times \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CO}_2}} = 3,63 \times \frac{100}{44} = 8,25\%$$

$$M_{\text{CaCO}_3} = M_{\text{Ca}} + 3 \times M_{\text{O}} + M_{\text{C}} = 40 + 3 \times 16 + 12 = 100\text{g/mol}$$

$$M_{\text{CO}_2} = M_{\text{C}} + 2 \times M_{\text{O}} = 12 + 2 \times 16 = 44\text{g/mol}$$

Cálculo teor total de Ca(OH)_2 consumido na reação de carbonatação:

$$\text{teor}_{\text{consumido r.carbonatação}} [\text{Ca(OH)}_2] = \text{teor} [\text{CaCO}_3] \times \frac{M_{\text{Ca(OH)}_2}}{M_{\text{CaCO}_3}} = 8,25 \times \frac{74}{100} = 6,11\%$$

Cálculo do teor de Ca(OH)_2 presente na amostra:

$$\text{teor}_{\text{presente}} [\text{Ca(OH)}_2] = \text{teor}_{\text{consumido r.carbonatação}} [\text{Ca(OH)}_2] + \text{teor}_{\text{livre}} [\text{Ca(OH)}_2] = 2,34 + 6,11 = 8,45\%$$

Cálculo teor relativo de Ca(OH)_2 consumido na reação de carbonatação:

$$\text{teor}_{\text{relativo consumido r.carbonatação}} [\text{Ca(OH)}_2] = \frac{\text{teor}_{\text{consumido r.carbonatação}} [\text{Ca(OH)}_2]}{\text{teor}_{\text{presente}} [\text{Ca(OH)}_2]} \times 100 = \frac{6,11}{8,45} = 72\%$$

Cálculo teor relativo de Ca(OH)_2 livre por reagir:

$$\text{teor}_{\text{relativo livre}} [\text{Ca(OH)}_2] = 100 - \text{teor}_{\text{relativo consumido}} [\text{Ca(OH)}_2] = 100 - 72 = 28\%$$

- Exemplo de cálculo para argamassa NHL_10Mk_M aos 28 dias

Cálculo o teor de Ca(OH)_2 livre na amostra:

$$\text{teor}_{\text{livre}} [\text{Ca(OH)}_2] = \text{pm}_{380-500^\circ\text{C}} \times \frac{M_{\text{Ca(OH)}_2}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = 0,28 \times \frac{74}{18} = 1,15\%$$

$$M_{\text{Ca(OH)}_2} = 74\text{g/mol}$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 18\text{g/mol}$$

Cálculo teor de CaCO_3 na amostra:

$$\text{teor} [\text{CaCO}_3] = \text{pm}_{500-850^\circ\text{C}} \times \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CO}_2}} = 3,00 \times \frac{100}{44} = 6,82\%$$

$$M_{\text{CaCO}_3} = 100\text{g/mol}$$

$$M_{\text{CO}_2} = 44\text{g/mol}$$

Cálculo do teor teórico de Ca(OH)_2 presente na amostra:

$$\text{teor}_{\text{presente}}^{\text{teórico}} [\text{Ca(OH)}_2] = \text{teor}_{\text{na NHL}_M}^{\text{presente}} [\text{Ca(OH)}_2] \times (1 - \%Mk) = 8,45 \times (1,00 - 0,10) = 7,60\%$$

Cálculo teor total de Ca(OH)_2 consumido na reação de carbonatação:

$$\text{teor}_{\text{r.carbonatação}}^{\text{consumido}} [\text{Ca(OH)}_2] = \text{teor} [\text{CaCO}_3] \times \frac{M_{\text{Ca(OH)}_2}}{M_{\text{CaCO}_3}} = 6,82 \times \frac{74}{100} = 5,05\%$$

Cálculo teor relativo de Ca(OH)_2 consumido na reação de carbonatação:

$$\text{teor}_{\text{r.carbonatação}}^{\text{relativo consumido}} [\text{Ca(OH)}_2] = \frac{\text{teor}_{\text{r.carbonatação}}^{\text{consumido}} [\text{Ca(OH)}_2]}{\text{teor}_{\text{presente}}^{\text{teórico}} [\text{Ca(OH)}_2]} \times 100 = \frac{5,05}{7,60} = 66\%$$

Cálculo teor de Ca(OH)_2 consumido na reação pozolânica:

$$\text{teor}_{\text{r.pozolânica}}^{\text{consumido}} [\text{Ca(OH)}_2] = \text{teor}_{\text{presente}}^{\text{teórico}} [\text{Ca(OH)}_2] - \text{teor}_{\text{presente}}^{\text{presente}} [\text{Ca(OH)}_2] = 7,60 - 6,20 = 1,40\%$$

Cálculo teor relativo de Ca(OH)_2 consumido na reação pozolânica:

$$\text{teor}_{\text{r.pozolânica}}^{\text{relativo consumido}} [\text{Ca(OH)}_2] = \frac{\text{teor}_{\text{r.pozolânica}}^{\text{consumido}} [\text{Ca(OH)}_2]}{\text{teor}_{\text{presente}}^{\text{teórico}} [\text{Ca(OH)}_2]} \times 100 = \frac{1,40}{7,60} = 19\%$$

Cálculo teor relativo de Ca(OH)_2 livre por reagir:

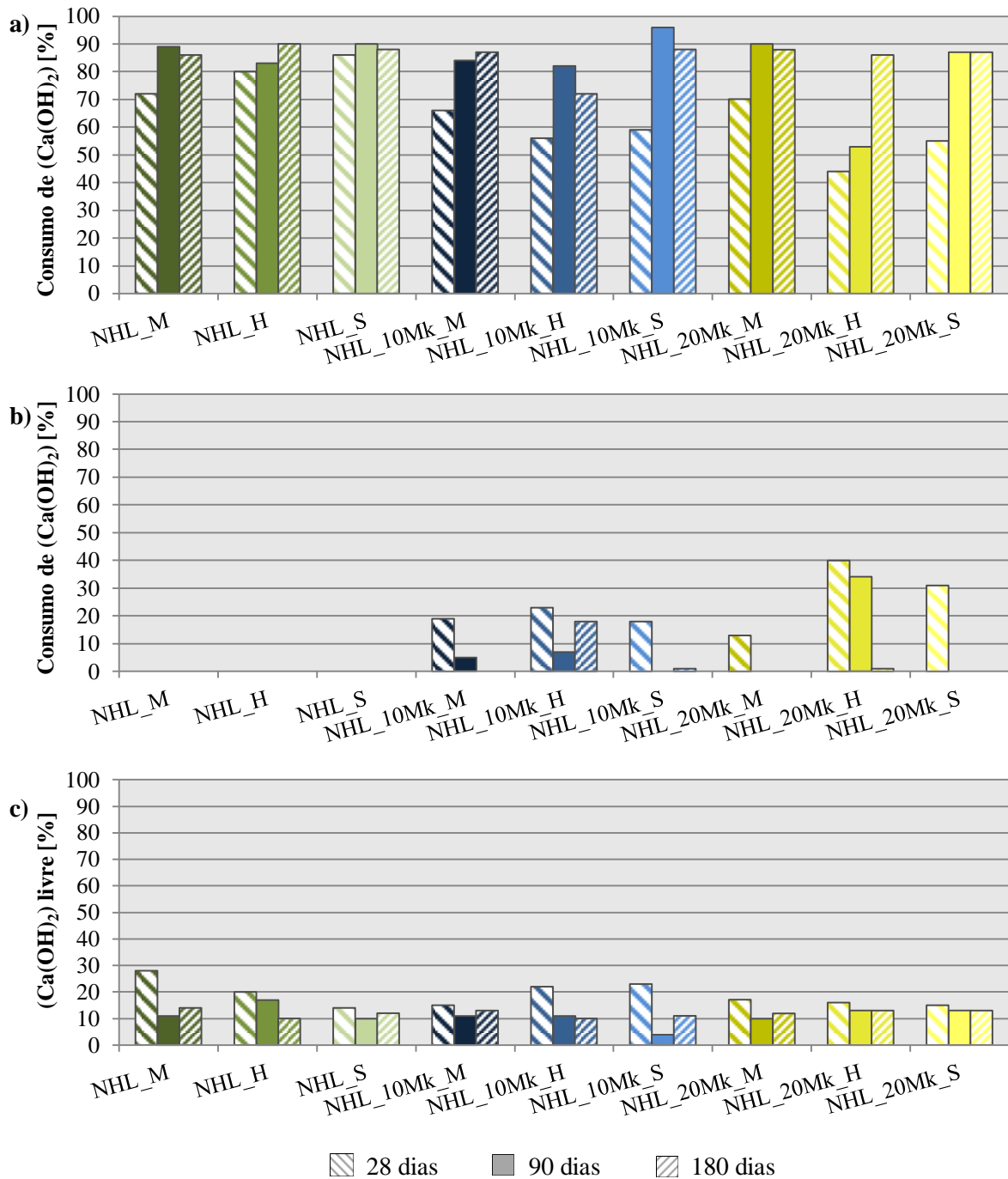
$$\begin{aligned} \text{teor}_{\text{livre}}^{\text{relativo}} [\text{Ca(OH)}_2] &= 100 - \left(\text{teor}_{\text{r.carbonatação}}^{\text{relativo consumido}} [\text{Ca(OH)}_2] + \text{teor}_{\text{r.pozolânica}}^{\text{relativo consumido}} [\text{Ca(OH)}_2] \right) \\ &= 100 - (66 + 19) = 15\% \end{aligned}$$

Quadro 4.15 – Consumo de cal nas reações químicas e cal livre

Argamassa	Consumo de cal na reação de carbonatação [%]			Consumo de cal na reação pozolânica [%]			Cal livre [%]		
	28 d	90 d	180 d	28 d	90 d	180 d	28 d	90 d	180 d
<i>NHL_M</i>	72	89	86	0	0	0	28	11	14
<i>NHL_10Mk_M</i>	66	84	87	19	5	0	15	11	13
<i>NHL_20Mk_M</i>	70	90	88	13	0	0	17	10	12
<i>NHL_H</i>	80	83	90	0	0	0	20	17	10
<i>NHL_10Mk_H</i>	56	82	72	23	7	18	22	11	10
<i>NHL_20Mk_H</i>	44	53	86	40	34	1	16	13	13
<i>NHL_S</i>	86	90	88	0	0	0	14	10	12
<i>NHL_10Mk_S</i>	59	96	88	18	0	1	23	4	11
<i>NHL_20Mk_S</i>	55	87	87	31	0	0	15	13	13

Da análise dos resultados obtidos é possível verificar que a reação de carbonatação é a dominante e a que aumenta com a idade, sendo esse aumento mais significativo nas argamassas com maior teor Mk.

Relativamente à reação pozolânica esta é mais acentuada nas argamassas NHL_20Mk e na cura H, sendo também visível que essa reação se desenvolve até às idades de 90 dias. Por outro lado é visível ainda, aos 180 dias, que em todas as argamassas existe Ca(OH)_2 livre para reagir, reação essa que deverá ser apenas de carbonatação tendo em consideração a evolução da reação pozolânica.



a) Reação de carbonatação b) Reação pozolânica c) Cal livre
Figura 4.38 – Cal consumida nas reações e cal livre

5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo vai efetuar-se um cruzamento dos resultados dos ensaios, procurando assim justificar características e comportamentos obtidos pelas argamassas, correlacionando parâmetros mecânicos físicos e químicos.

No Quadro 5.1 apresentam-se uma compilação dos resultados de todos os ensaios de caracterização e respetivos desvios padrão.

5.1 Parâmetros mecânicos

Na Figura 5.1 apresentam-se as evoluções de R_t , R_c e E_{din} , de todas as argamassas, em todas as idades. Analisando a figura constata-se que os três parâmetros têm evoluções semelhantes, verificando-se a mesma tendência e evolução em todas as argamassas, validando os resultados obtidos.

Os maiores valores de resistências mecânicas são obtidos pelas argamassas da cura H e estes resultados são explicados pelos resultados químicos e mineralógicos. Nesta cura a reação de hidratação foi de grande importância, devido à maior proporção de compostos hidratados (monocarboaluminato, etringite e hidrocalumite), que por sua vez são bastante relevantes para o desenvolvimento das resistências mecânicas. Os maiores valores desenvolvidos pelas argamassas com Mk nesta cura devem-se à ocorrência de vaterite, e à sua evolução com a idade, e aos compostos hidratados fruto da reação pozolânica, como se pode constatar na análise XRD (Figura 4.34) e TGA (Figura 4.36) onde se observa o grande consumo de portlandite na reação pozolânica.

Estas argamassas de cura H sofrem uma evolução dos 28 para os 90 dias devido à reação de carbonatação e total hidratação da belite; dos 90 para os 180 dias não se regista uma evolução significativa, principalmente na argamassa NHL_20Mk, em grande parte devido a total hidratação da belite e à não ocorrência da reação pozolânica, uma vez que esta já ocorreu na sua totalidade não se registando assim a sua presença.

As argamassas da cura S apresentam as menores resistências mecânicas, em grande parte devido à predominância da reação de carbonatação sobre a reação de hidratação. A belite sofre nesta cura uma hidratação mais lenta que nas outras curas (Figura 4.35), o que por si só justifica os menores valores de resistências registados.

As argamassas desta cura S não sofrem grandes evoluções com a idade. Tal facto é justificado com os resultados da TGA e XRD, onde a reação pozolânica e a reação de carbonatação acontecem na sua totalidade até aos 28 dias (Figura 4.37 e Figura 4.38); outro facto que o comprova é o desaparecimento dos picos de portlandite (Figura 4.35), sinal de que a portlandite foi já consumida na sua quase totalidade. A diminuição da R_t e R_c ocorrida dos 90 para os 180 dias nas argamassas com Mk pode ser atribuída à instabilidade que se verifica existir dos compostos hidratados formados na reação pozolânica da cal com Mk.

Quadro 5.1 – Síntese de todos os resultados

Ensaio	Idade e DP	NHL_M	NHL_H	NHL_S	NHL_10Mk_M	NHL_10Mk_H	NHL_10Mk_S	NHL_20Mk_M	NHL_20Mk_H	NHL_20Mk_S
E_{din} [MPa]	28d	4142	5181	4094	5457	9185	4951	8904	12786	7746
	DP	127	467	82	172	251	743	219	1444	246
	90d	6469	6982	4447	5514	9425	4256	7271	11861	8382
	DP	217	181	190	399	965	320	615	890	705
	180d	6746	7243	4694	4788	8285	4559	5875	8828	6959
	DP	227	198	170	110	306	762	963	1211	521
R_t [MPa]	28d	0,50	0,87	0,52	0,88	0,75	0,84	1,14	1,39	1,11
	DP	0,02	0,05	0,04	0,03	0,09	0,13	0,02	0,16	0,06
	90d	1,06	1,19	0,53	0,84	1,30	0,71	1,13	1,49	0,85
	DP	0,01	0,05	0,04	0,12	0,14	0,10	0,10	0,14	0,07
	180d	1,14	1,27	0,58	0,88	1,38	0,64	0,88	1,33	1,13
	DP	0,03	0,16	0,04	0,05	0,03	0,11	0,07	0,10	0,04
R_c [MPa]	28d	1,19	1,51	1,01	3,16	3,75	4,07	6,54	7,10	6,93
	DP	0,14	0,16	0,02	0,03	0,32	0,61	0,31	0,68	0,13
	90d	2,54	2,36	1,22	4,73	4,02	4,42	5,88	7,64	6,52
	DP	0,16	0,40	0,12	0,62	0,90	0,21	1,34	0,64	0,44
	180d	2,54	2,50	1,14	4,02	3,62	3,76	5,10	5,09	4,53
	DP	0,37	0,12	0,13	0,71	0,32	1,29	1,25	0,41	1,52
CC [kg/(m ² .min ^{0,5})]	28d	3,48	2,88	3,56	2,43	2,10	2,23	1,55	1,46	1,66
	DP	0,12	0,41	0,23	0,15	0,04	0,06	0,08	0,04	0,15
	90d	2,79	2,56	3,56	2,16	2,56	2,29	1,71	1,16	1,56
	DP	0,07	0,12	0,24	0,13	0,12	0,16	0,05	0,15	0,15
	180d	3,09	2,72	3,61	2,33	2,29	2,43	2,04	2,12	1,89
	DP	0,26	0,16	0,05	0,16	0,14	0,43	0,22	0,29	0,00

Ensaio	Idade e DP	NHL_M	NHL_H	NHL_S	NHL_10Mk_M	NHL_10Mk_H	NHL_10Mk_S	NHL_20Mk_M	NHL_20Mk_H	NHL_20Mk_S
VA [kg/m ²]	28d	21,9	21,9	21,4	23,9	22,5	21,8	22,7	23,1	22,7
	DP	0,5	1,6	1,1	2,8	1,7	1,9	0,9	0,5	0,8
	90d	19,7	20,2	20,1	19,6	20,2	21,0	19,7	16,9	20,7
	DP	0,7	1,5	1,5	0,9	1,5	1,3	1,3	0,4	1,1
	180d	19,4	19,7	19,7	20,6	22,9	21,1	20,7	20,8	21,9
	DP	1,4	2,1	0,6	0,7	1,5	2,2	0,6	0,5	1,6
IS [-]	28d	0,34	0,33	0,32	0,35	0,36	0,35	0,38	0,40	0,37
	DP	0,03	0,03	0,00	0,05	0,07	0,05	0,11	0,13	0,09
	90d	0,32	0,36	0,33	0,33	0,36	0,34	0,35	0,36	0,36
	DP	0,01	0,04	0,01	0,02	0,06	0,03	0,06	0,07	0,07
	180d	0,34	0,34	0,32	0,48	0,41	0,37	0,43	0,40	0,41
	DP	0,09	0,02	0,07	0,11	0,03	0,00	0,02	0,01	0,03
TS [kg/(m ² .h)]	28d	0,13	0,13	0,13	0,14	0,12	0,14	0,12	0,10	0,12
	DP	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
	90d	0,10	0,11	0,09	0,11	0,09	0,10	0,09	0,11	0,10
	DP	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,01	0,00
	180d	0,10	0,11	0,09	0,07	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10
	DP	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
P _{ab} mét. hidrostático [%]	28d	28,1	28,6	27,9	28,3	27,9	27,7	27,7	28,0	27,1
	DP	0,2	0,9	0,6	0,2	0,8	0,7	0,1	0,6	0,2
	90d	26,0	27,7	27,4	27,6	27,3	27,4	27,4	27,1	27,7
	DP	0,2	0,8	1,1	1,0	0,6	0,4	0,0	0,2	0,4
	180d	25,1	25,9	25,7	26,2	26,7	26,2	26,2	26,5	26,5
	DP	0,5	1,3	0,5	0,6	0,6	0,9	0,2	0,3	0,5

Ensaio	Idade e DP	NHL_M	NHL_H	NHL_S	NHL_10Mk_M	NHL_10Mk_H	NHL_10Mk_S	NHL_20Mk_M	NHL_20Mk_H	NHL_20Mk_S
MVA mét. hidrostático [kg/m³]	28d	1787	1762	1783	1735	1755	1759	1733	1750	1753
	DP	9	19	9	11	10	18	22	15	23
	90d	1821	1801	1802	1776	1763	1780	1761	1772	1761
	DP	11	9	26	27	15	7	16	7	10
	180d	1903	1902	1884	1855	1845	1848	1838	1826	1835
	DP	8	12	18	17	13	14	3	7	19
Pab porosimetria [%]	28d	27,7	27,7	27,4	28,1	27,7	26,9	26,3	27,8	27,7
	90d	25,9	26,7	26,4	23,0	25,8	25,9	26,2	27,3	27,2
	180d	26,8	24,9	28,7	27,4	29,6	27,6	29,8	28,1	29,7
MVA porosimetria [kg/m³]	28d	1816	1800	1841	1805	1790	1792	1826	1804	1811
	90d	1880	1843	1845	1763	1852	1833	1808	1793	1777
	180d	2026	1968	1953	1900	1894	1899	1945	1831	1877
Δ de massa res. sulfatos 11º ciclo [%]	28d	2,4	2,4	2	-67,4	-70,2	-78,6	-69,6	-30,8	-64,6
	90d	-0,9	1,0	2,7	-85,1	-100,0	-22,6	-59,7	-67,7	-32,2
λ [W/(m.K)]	28d	0,84	0,88	0,88	0,94	0,97	0,91	1,02	1,08	0,94
	90d	0,85	0,94	0,8	0,88	1,00	0,85	1,11	1,25	0,93

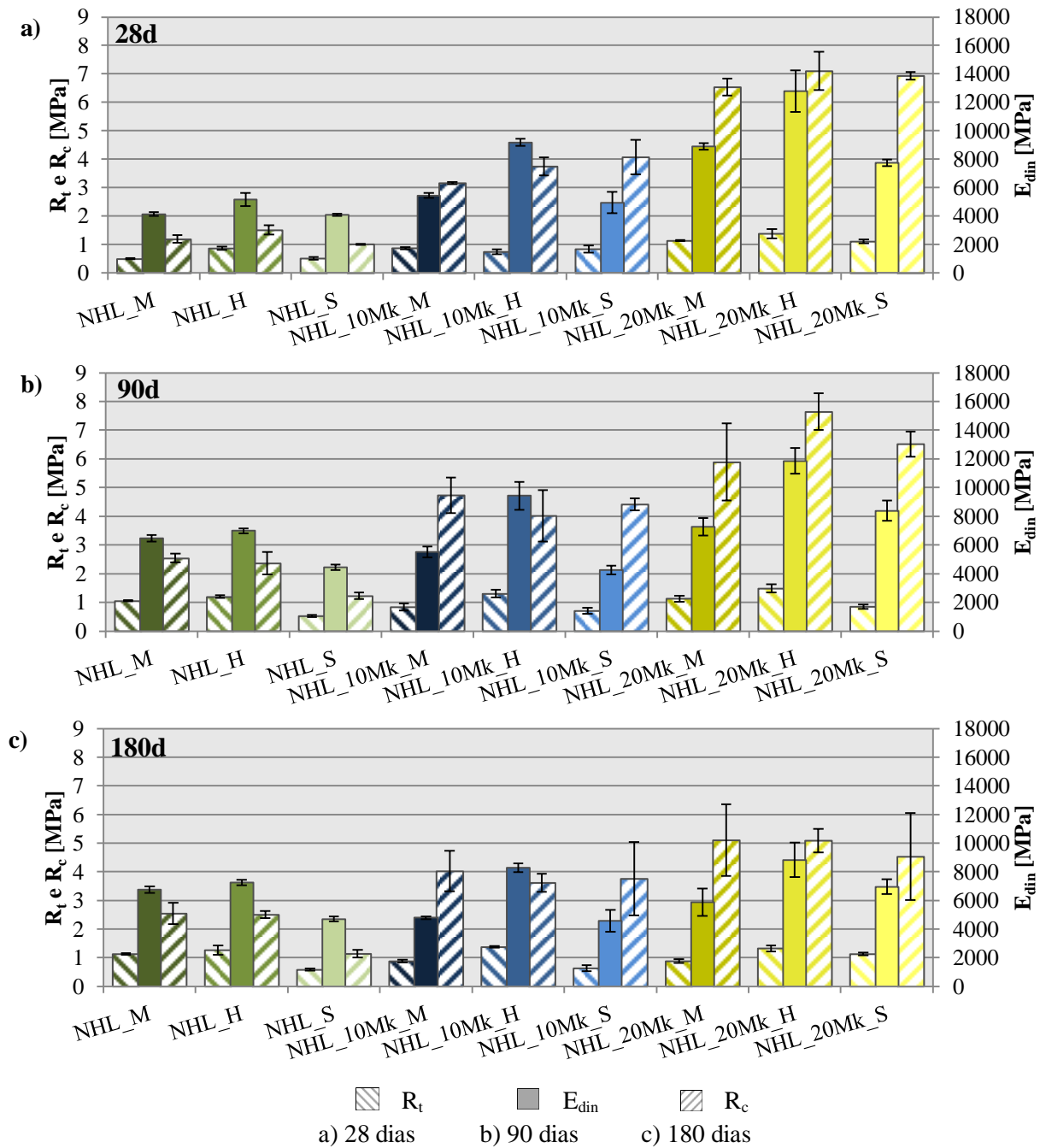


Figura 5.1 – Evolução comparativa dos parâmetros mecânicos de todas as argamassas

Uma vez que os parâmetros mecânicos apresentam, de uma forma geral, a mesma evolução, vai efetuar-se o cruzamento de resultados de MVA apenas com um deles, no caso a R_t , Figura 5.2. Nesta análise ter-se-á que ter em conta o intervalo do eixo de MVA, uma vez que as diferenças entre os valores das mesmas argamassas ao longo da idade são mínimas. Uma análise da figura permite verificar, ao contrário do primeiramente intuído, que um aumento da MVA, ainda que ligeiro, nem sempre se traduz num aumento de resistência. Analisando as argamassas NHL, regista-se que estas apresentam um aumento de R_t quando aumenta a MVA; já as argamassas com Mk não apresentam em alguns casos essa mesma tendência, registrando por vezes diminuições de R_t quando a MVA aumenta,

o que leva a crer que os compostos responsáveis pelas resistências mecânicas, nomeadamente os compostos hidratados, podem não se traduzir em variações significativas da MVA das argamassas.

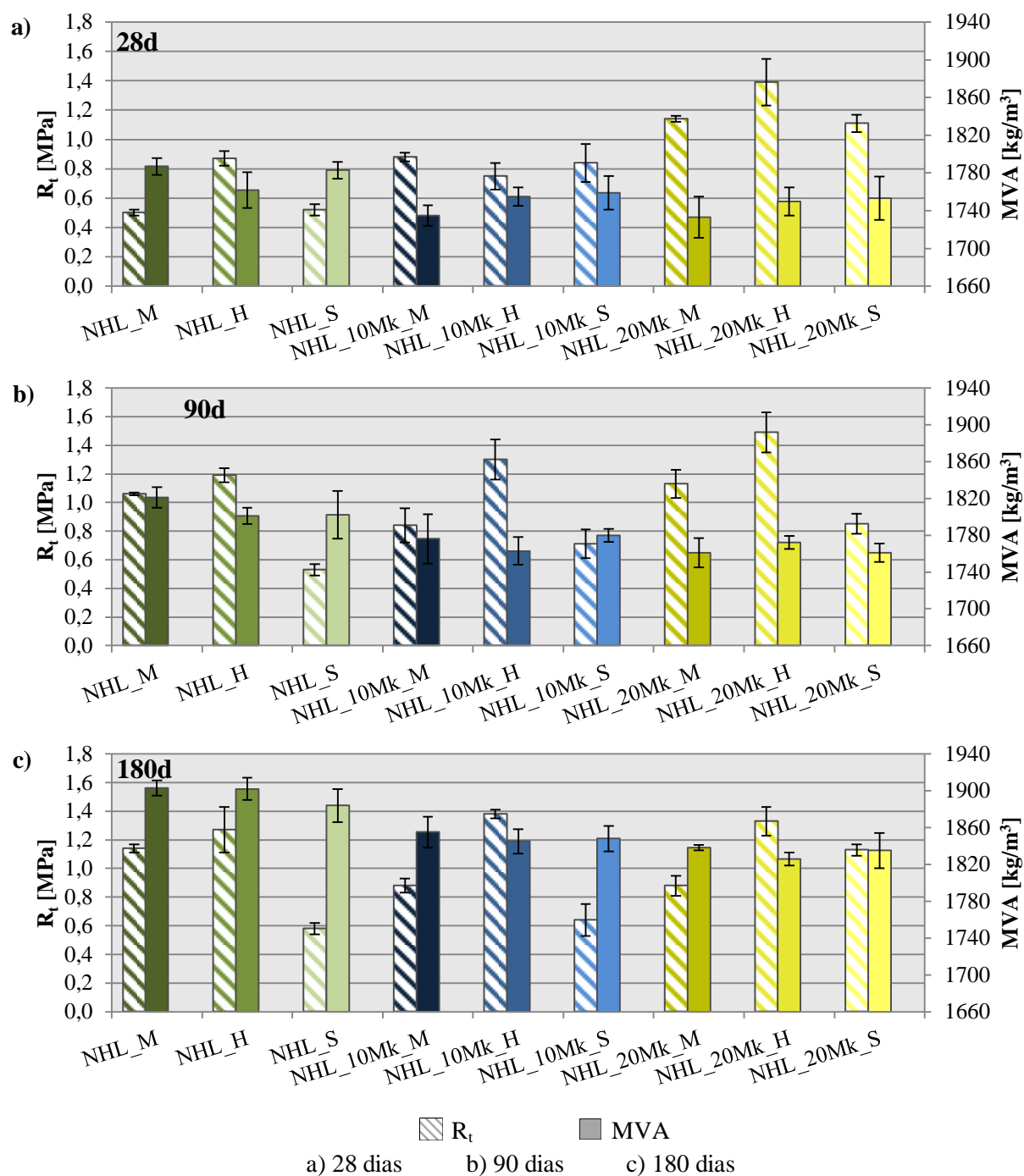


Figura 5.2 – Evolução comparativa da resistência à tração e da massa volúmica aparente

5.2 Porosidade aberta e massa volúmica aparente

Na Figura 5.3 registam-se os valores obtidos para a porosidade aberta e massa volúmica aparente obtidos pelo método hidrostático e pela porosimetria de mercúrio; uma análise dos resultados obtidos pelos dois métodos permite constatar que as diferenças de resultados entre estes são mínimas,

o que se constitui como um facto positivo, uma vez que o método hidrostático (que se pensava ser menos preciso sendo no entanto mais simples de executar, face à porosimetria, método mais dispendioso, complexo e menos sustentável), apresenta valores muito próximos e aceitáveis, com vantagens laboratoriais evidentes. O método hidrostático apresenta-se então como um método fiável a utilizar quando se pretender aferir acerca da porosidade aberta e da massa volúmica aparente, pelo menos deste tipo de argamassas.

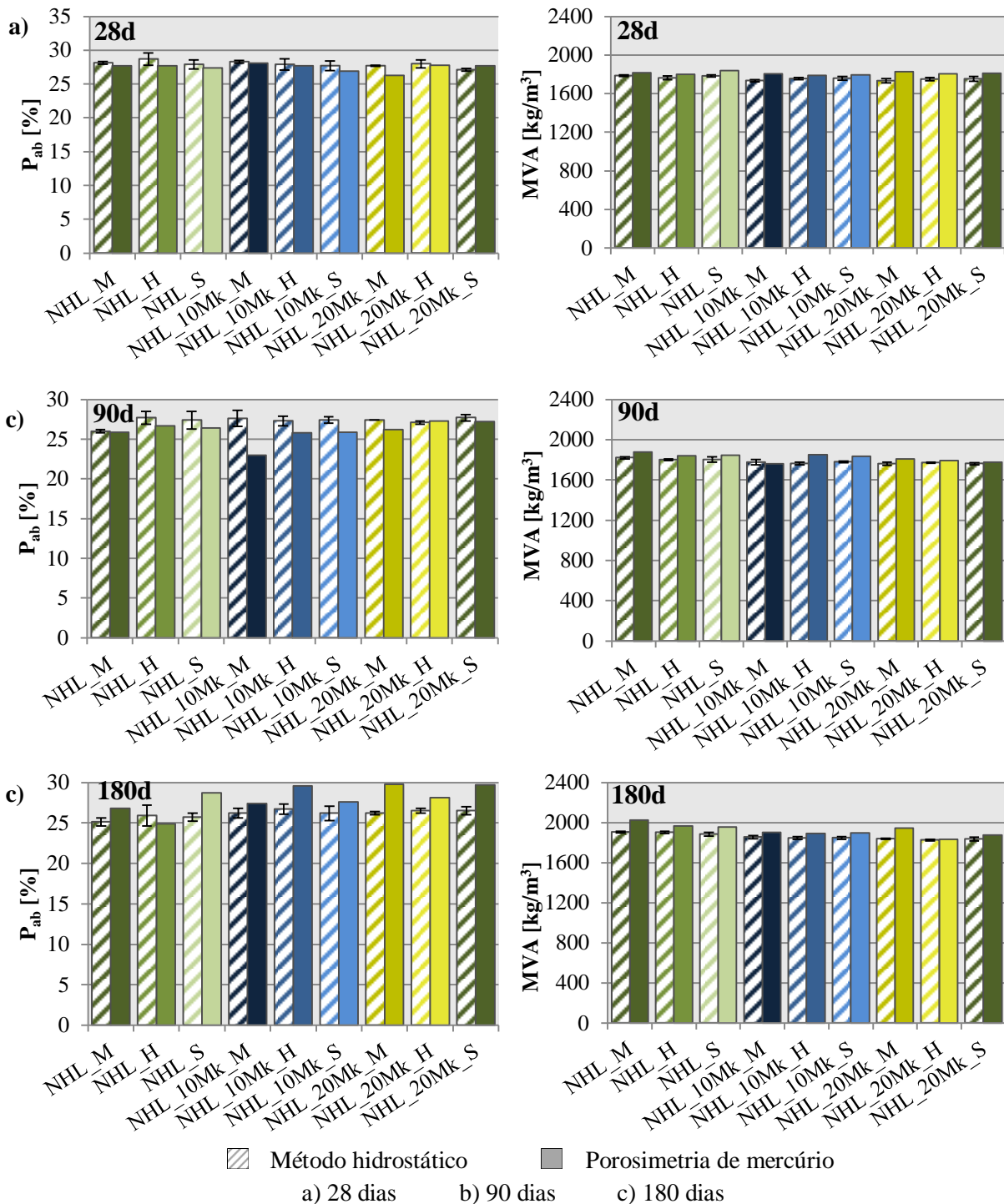


Figura 5.3 – Comparação entre o método hidrostático e porosimetria de mercúrio

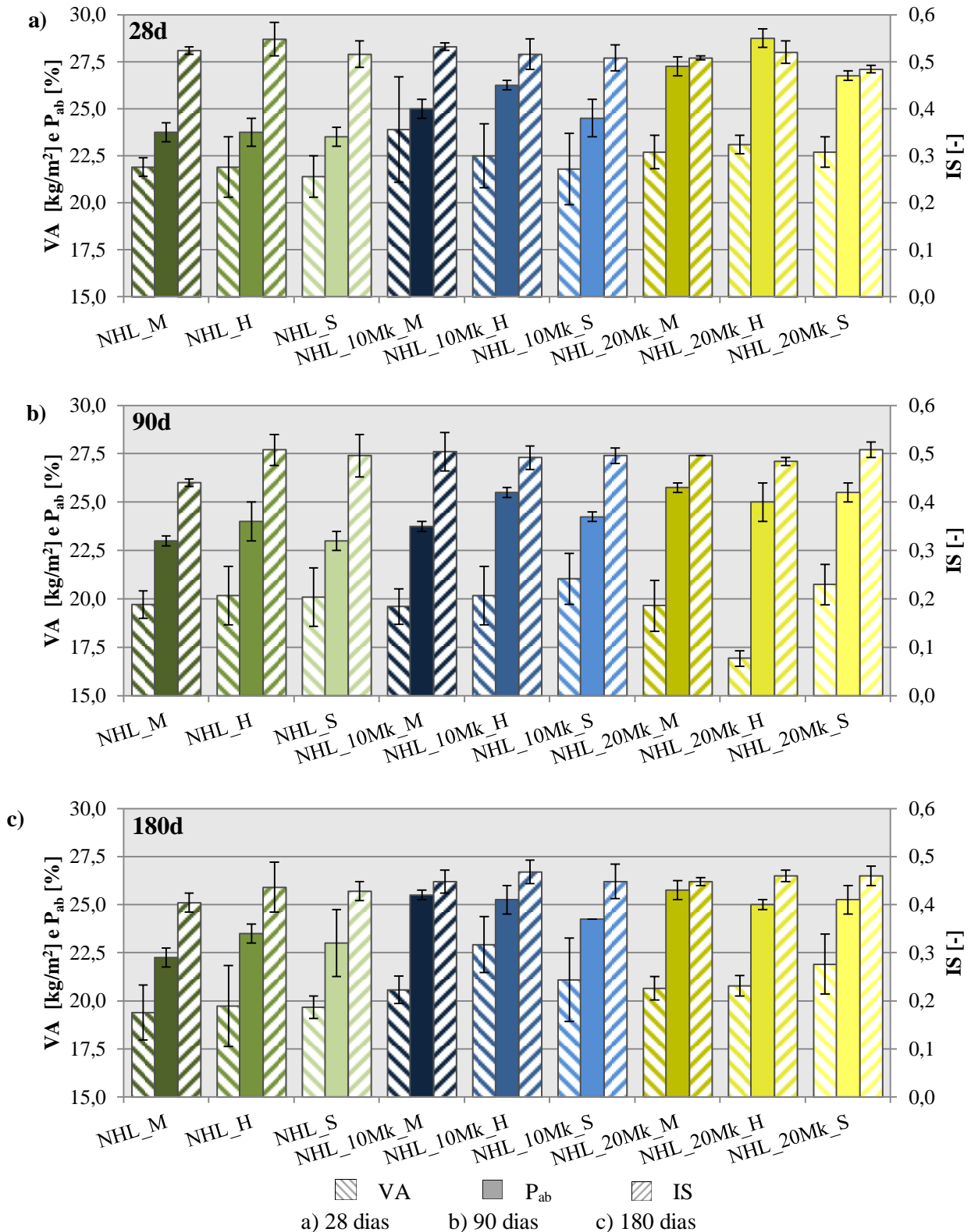


Figura 5.7 – Evolução do valor assintótico e do índice de secagem com a porosidade aberta

Em face da necessidade de avaliação conjunta do comportamento das argamassas face à absorção e secagem de água, estabeleceu-se neste trabalho um parâmetro que relaciona as primeiras

horas de secagem, TS, com os primeiros minutos de absorção capilar, CC; daqui em diante esse parâmetro passará a designar-se por AB, comportamento *aqua* (*Aqua Behaviour*):

$$AB = \frac{TS}{CC}$$

(equação 5.1)

Onde,

AB [$h^{0.5}$]: comportamento *aqua*

TS [$kg/(m^2 \cdot h)$]: taxa de secagem

CC [$kg/(m^2 \cdot h^{0.5})$]: coeficiente de capilaridade

Nota: A ter em atenção a conversão da unidade do CC de $kg/(m^2 \cdot min^{0.5})$ para $kg/(m^2 \cdot h^{0.5})$, uma vez que ao longo do trabalho a unidade usada para o parâmetro é sempre o $kg/(m^2 \cdot min^{0.5})$.

Este parâmetro criado apresenta uma unidade de raiz do tempo, ($h^{0.5}$), fruto das unidades dos dois parâmetros usados no seu cálculo (CC e TS); no entanto, essa unidade não terá grande significado, servindo os valores de AB apenas para comparação direta entre argamassas. O ideal para o parâmetro será que este tenha um valor elevado, de modo que, por mais alta que seja a velocidade de absorção de água por capilaridade, o reboco possa secar rapidamente.

Na Figura 5.8 regista-se a evolução do AB face à evolução dos valores de CC e TS. Aos 28 dias o CC tem um desenvolvimento semelhante à TS, como se pode comprovar na Figura 5.8a pelas mesmas tendências de evolução; esta situação altera-se nas idades de 90 e 180 dias.

Aos 90 e 180 dias, Figura 5.8b e c, pode constatar-se claramente que os dois parâmetros passam, na generalidade, a ser inversos na evolução, decrescendo o CC quando à TS aumenta e vice-versa. Tal evolução permite analisar melhor o parâmetro AB.

Na generalidade o AB é tanto maior quanto o teor de metacaulino na argamassa, não se destacando nenhuma cura pelos seus maiores ou menores valores. De assinalar o comportamento das argamassa sem Mk (NHL) pelos seus menores valores de AB devido aos valores de CC mais elevados (uma vez que os valores de TS não apresentam grande variações entre as argamassas). Do lado oposto encontram-se as argamassas com Mk, com maior destaque para as argamassa NHL_20Mk, que têm valores baixos de CC, contribuindo assim para maiores valores de AB.

A destacar também o comportamento algo inesperado da argamassa NHL_20Mk_H à idade de 90 dias (já referida anteriormente), que apresenta um grande valor de AB, fruto de uma elevada TS, e um valor muito baixo (comparativamente a outras argamassas) de CC.

Em suma e no âmbito da análise realizada até à data quanto ao comportamento à água de uma argamassa (e ao parâmetro AB), fica o registo de que o CC é o parâmetro que mais influência tem neste tipo de argamassas.

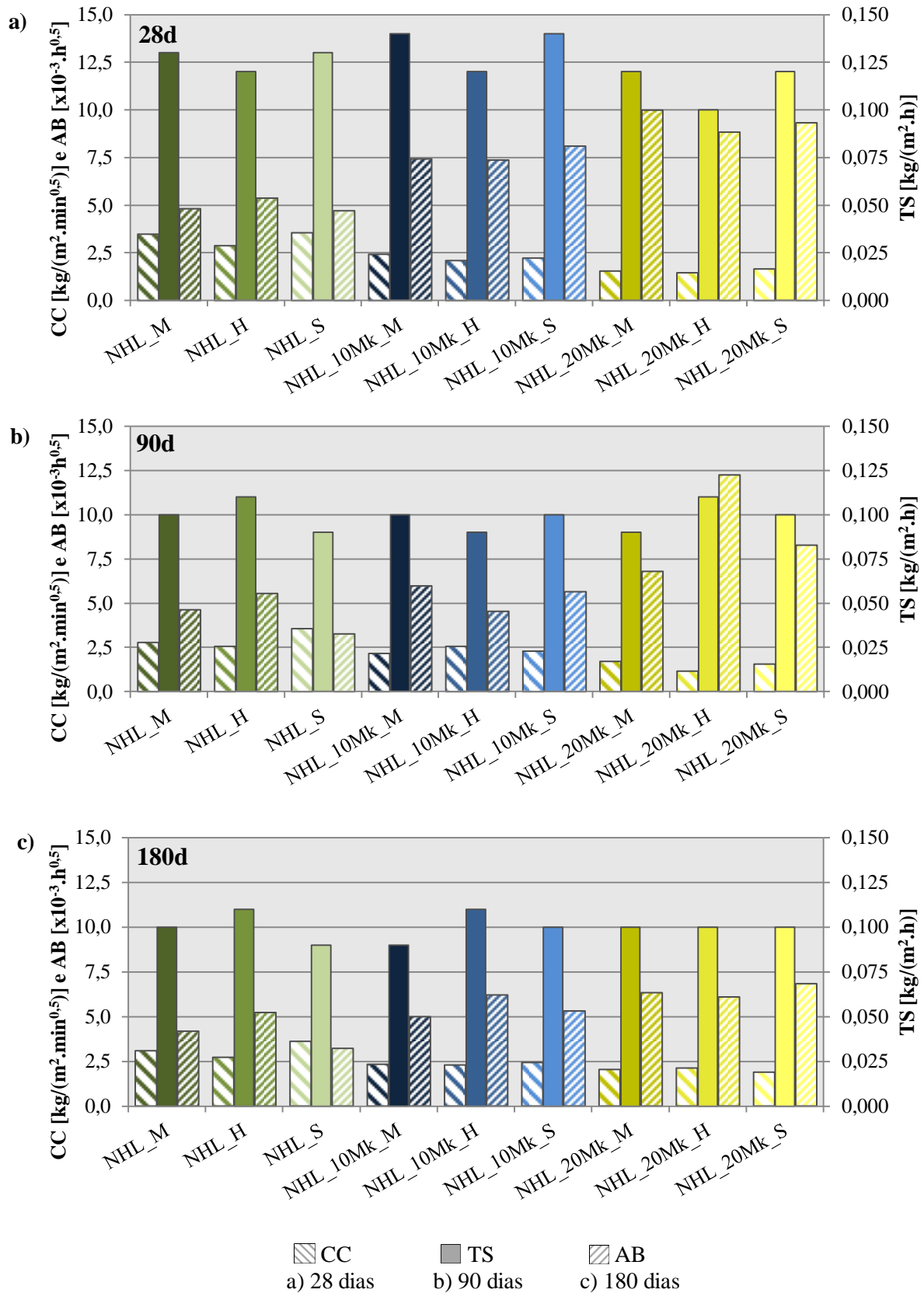


Figura 5.8 – Evolução do coeficiente de capilaridade e taxa de secagem com o comportamento aqua

5.5 Classificação das argamassas para o uso em edifícios antigos

Ao nível do uso das argamassas em edifícios antigos Veiga (2010) definiu uma gama de valores requeridos para argamassas de substituição e refechamento de juntas em edifícios antigos (ver Quadro 2.3 em 2.2.2). É com base nesses valores obtidos aos 90 dias que se vão classificar as argamassas para aplicação em edifícios antigos, tendo em conta nomeadamente os parâmetros mecânicos. Na Figura 5.9 podem ser consultados os valores de R_t , R_c e E_{din} de todas as argamassas aos 90 dias e as linhas que balizam os intervalos definidos por Veiga (2010) para as utilizações em rebocos ou refechamento de juntas.

- *Rebocos*

Uma análise da Figura 5.9 permite observar que, em relação à R_t , as únicas argamassas que se enquadram no intervalo requerido são a NHL_S e a NHL_10Mk_S; em termos de R_c todas as argamassas NHL sem Mk estão compreendidas no intervalo requerido; ao nível de E_{din} mais uma vez as argamassas NHL_S e NHL_10Mk_S são as que se enquadram no intervalo

- *Refechamento de juntas*

Os valores de R_t da argamassa NHL_10Mk_H e todas as da cura S (NHL, NHL_10Mk e NHL_20Mk) estão compreendidos no requisitado; ao nível de R_c todas as argamassas NHL sem Mk se enquadram no intervalo requerido; observando os valores de E_{din} os que se enquadram no requerido são os das argamassas NHL_S, NHL_10Mk_M e NHL_10Mk_S.

Considerando apenas os três parâmetros mecânicos, a única argamassa que se enquadra em todos, e logo aconselhável para aplicação em rebocos e refechamento de juntas em edifícios antigos, é a argamassa NHL_S. Considerando o parâmetro CC, segundo os limites de Veiga (2010), constata-se que nenhuma das argamassas analisadas cumpre esses limites e, como tal, nenhuma das argamassas será aplicável quer em rebocos, quer no refechamento de juntas de edifícios antigos.

No entanto, comparando os valores obtidos de CC para as argamassas estudadas (tendo como ligante a NHL3.5) com outras argamassas analisadas segundo os mesmos procedimentos de ensaio e tratamento de dados, realizadas com base em cal aérea [BANDEIRA, 2012], verifica-se que os valores de CC obtidos são muito similares (embora muitos se encontrem fora da gama definida por Veiga (2010)). Considerando as argamassas de cal aérea como compatíveis com edifícios antigos, admite-se que também a argamassa NHL_S possa eventualmente ser compatível com algumas destas aplicações.

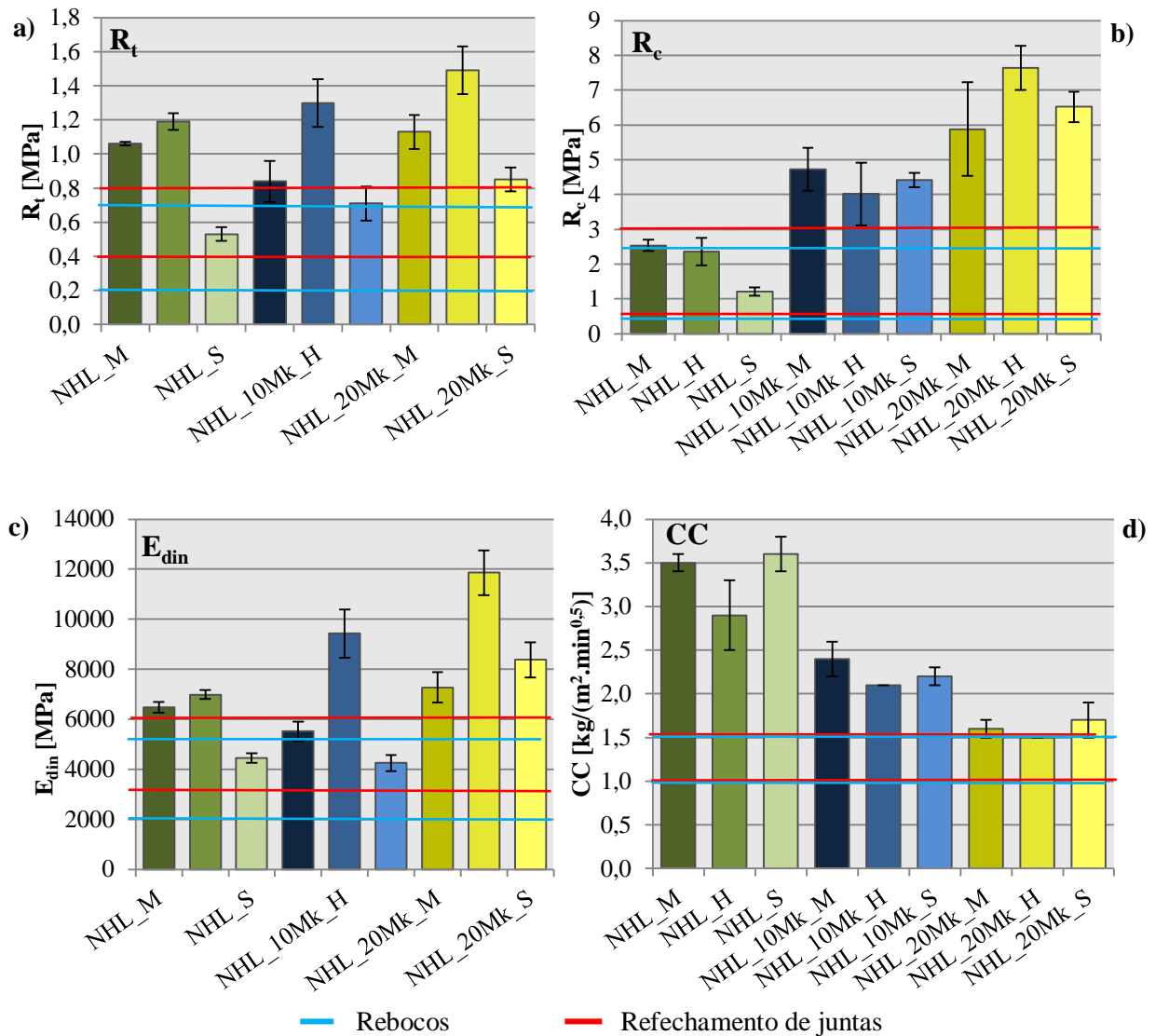


Figura 5.9 – Parâmetros mecânicos de classificação de argamassas para rebocos e refecamento de juntas, segundo Veiga (2010)

5.6 Argamassas para rebocos de alvenarias

A norma EN 998-1:2010 [CEN, 2010] definiu uma gama de valores requeridos para argamassas de rebocos. Com base nesses valores vão classificar-se as argamassas, tendo em conta as resistências mecânicas e o CC. O Quadro 5.2 compila esses valores requeridos e a designação das argamassas para cada utilização; embora a norma defina mais parâmetros de caracterização, optou por colocar apenas os que foram estudados. Na Figura 5.10 podem ser consultados os valores de R_c e CC de todas as argamassas aos 28 dias e as linhas que balizam os intervalos definidos para as utilizações em rebocos.

Quadro 5.2 – Gama de valores requeridos para argamassas endurecidas para rebocos segundo a EN 998-1:2010 [CEN, 2010]

Abreviaturas	Descrição			
GP	Rebocos para alvenarias (interiores e exteriores)			
Propriedades	Categorias		Valores	
Resistência à compressão aos 28 dias	CS I		0,4 - 2,5 N/mm ²	
	CS II		1,5 - 5 N/mm ²	
	CS III		3,5 - 7,5 N/mm ²	
	CS IV		≥ 6 N/mm ²	
Coefficiente de absorção capilar	W 0		não especificado	
	W 1		CC ≤ 0,40 kg/m ² .min ^{0,5}	
	W 2		CC ≤ 0,20 kg/m ² .min ^{0,5}	
N.º	Parâmetro de teste	Método de teste	GP	R_c
L2	Categorias de resistência	EN 1015-11	CS I a CS IV	CS II
N.º	Parâmetro de teste	Método de teste	GP	CC
L5	Categorias de absorção capilar de água (para alvenarias de elementos exteriores)	EN 1015-18	W 0 a W 2	≥ 0,3 kg/(m ² .min ^{0,5}) após 24h

*– A norma contempla notas sobre valores e ensaios; para acesso aos mesmo consultar a norma

- Rebocos para alvenarias (interiores e exteriores)

Este tipo de reboco contempla para o parâmetro R_c as argamassas de categoria CS I a CS IV, ou seja, todas as argamassas. Na classe CS I enquadram-se todas as argamassas NHL; na classe CS II, todas as argamassas NHL_10Mk e a argamassa NHL_H; na classe CS III, todas as argamassas NHL_20Mk e ainda as argamassas NHL_10Mk_H e NHL_10Mk_S; na classe CS IV enquadram-se todas as argamassas NHL_20Mk. O parâmetro CC contempla as categorias W 0 a W 2; no entanto, nenhuma argamassa se enquadra na classe W 1 e W 2, enquadrando-se todas as argamassa na classe genérica W 0.

Considerando os dois parâmetros conclui-se que, face aos requisitos da norma EN 998-1:2010, todas as argamassas se enquadram no uso em rebocos (GP).

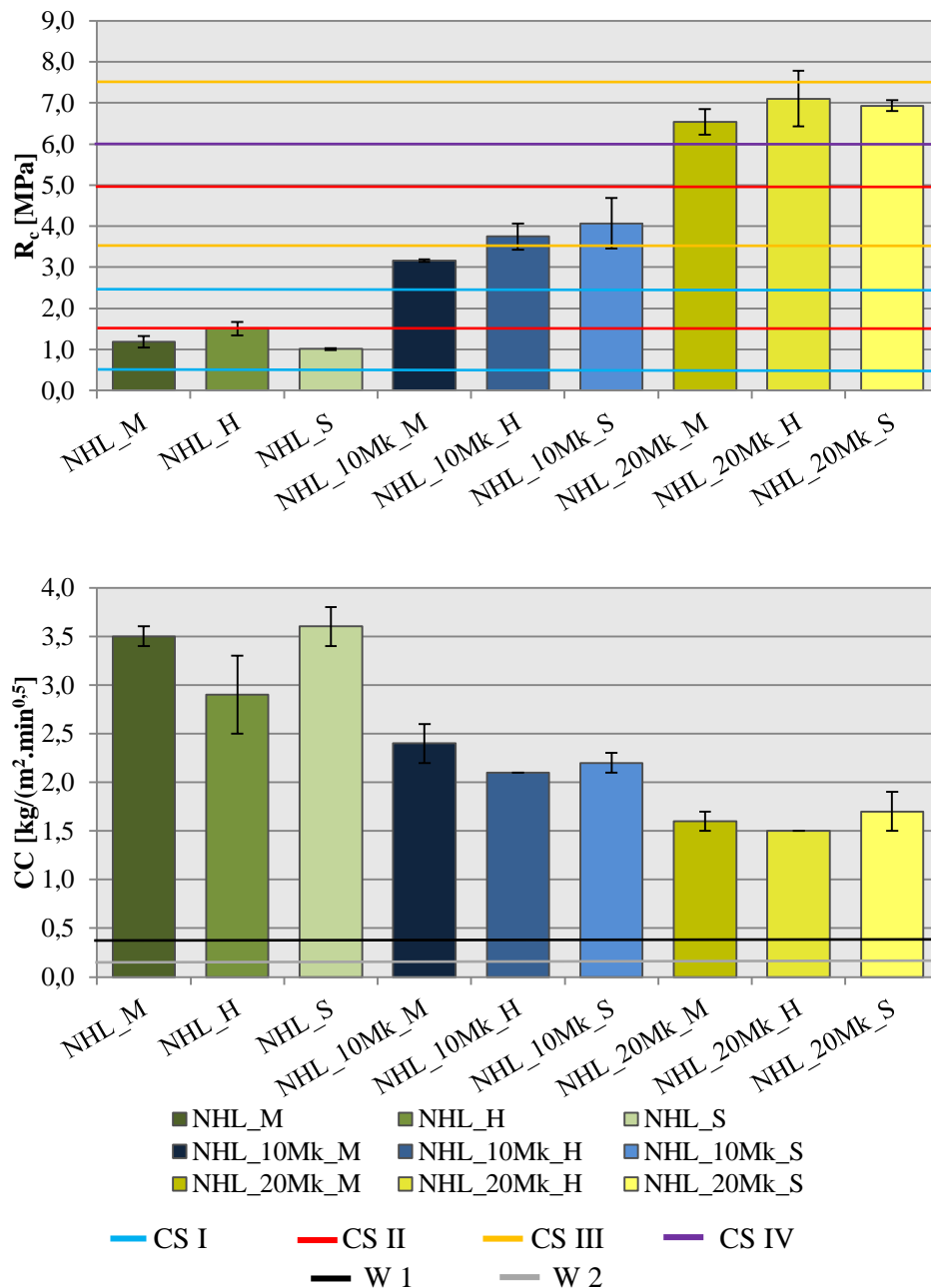


Figura 5.10 – Parâmetros de classificação de argamassas para rebocos, segundo a EN 998-1:2010 [CEN, 2010]

5.7 Outros trabalhos

Ao nível de outros estudos onde se estudaram comportamentos de argamassas com ensaios realizados segundo procedimentos e tratamento de resultados idênticos aos que foram usados neste trabalho, destaca-se o trabalho desenvolvido por Bandeira [BANDEIRA, 2012] que fez o estudo comparativo entre argamassas de uma cal hidráulica natural diferente da utilizada no presente trabalho (à data identificada como NHL5) e de uma cal aérea (formuladas com ligantes produzidos também ainda antes da entrada em vigor da norma NP EN 459-1:2011). Bandeira estudou o comportamento dessas argamassas com a idade de 180 dias, idade à qual os seus resultados são comparados com os

das argamassas do presente trabalho. No Quadro 5.3 regista-se uma breve descrição das argamassas estudadas por Bandeira.

Quadro 5.3 – Designação, traço volumétrico, substituição de massa de cal por Mk e cura das argamassas estudadas por Bandeira [Bandeira, 2012]

Designação	Traço volumétrico	Substituição de massa de cal por Mk [%]	Cura
Cal aérea			
CL.1_H	1:1	0	H
CL.2_H	1:2	0	H
CL.3_H	1:3	0	H
CL.1_Mk30_H	1:1	30	H
CL.2_Mk30_H	1:2	30	H
CL.3_Mk30_H	1:3	30	H
CL.1_Mk50_H	1:1	50	H
CL.2_Mk50_H	1:2	50	H
CL.3_Mk50_H	1:3	50	H
Cal hidráulica natural “NHL5”			
NHL.3_H	1:3	0	H
NHL.3_5Mk_H		5	H
NHL.3_10Mk_H		10	H
NHL.3_20Mk_H		20	H

Na Figura 5.11 regista-se a evolução dos parâmetros mecânicos dessas argamassas e, para comparação, das argamassas de cal NHL 3.5 estudadas neste trabalho. É possível constatar que, em termos de resistências mecânicas, as argamassas sem Mk estudadas no presente trabalho apresentam valores mais elevados que as argamassas estudadas por Bandeira; relativamente às argamassas com Mk, as argamassas estudadas no presente trabalho apresentam valores mais elevados que argamassas de cal hidráulica natural analisadas por Bandeira, independentemente da percentagem de substituição. Ainda relativamente às resistências mecânicas, as argamassas de cal aérea ao mesmo traço volumétrico que as estudadas neste trabalho (1:3), apresentam valores inferiores seja qual for o teor de substituição de Mk; para traços volumétricos mais ricos em ligante (1:1 e 1:2), as argamassas de cal aérea com substituição de cal por Mk atingem valores comparáveis a algumas das argamassas analisadas neste trabalho. Em suma as argamassas estudadas neste trabalho apresentam no geral resistências mecânicas superiores às argamassas de cal hidráulica natural e aérea estudada por Bandeira, podendo os valores ser comparáveis a algumas argamassas de cal aérea com Mk e traços mais fortes em ligante. O facto das argamassas de NHL3.5 registarem valores superiores aos das argamassas “NHL5” utilizada nas argamassas caracterizadas por Bandeira demonstra que esta última

cal não estava ainda na sua formulação definitiva (produção de Junho de 2011) e não era efetivamente ainda uma NHL5.

Na Figura 5.12 registam-se os parâmetros de capilaridade e secagem, CC, TS e AB, das argamassas estudadas por Bandeira (cal aérea e cal hidráulica natural “NHL5”) e das argamassas da cal NHL3.5 estudada no presente trabalho.

Uma análise da Figura 5.12 permite observar que as argamassas sem Mk de cal hidráulica natural “NHL5” têm evoluções de CC semelhantes às registadas pelas argamassas estudadas neste trabalho, tal como as argamassas de cal aérea, independentemente do traço volumétrico. Com a inclusão de Mk todas as argamassas apresentam também valores semelhantes. Em termos de TS, as argamassas sem Mk apresentam também valores semelhantes entre todas elas; já com a inclusão de Mk regista-se uma maior TS nas argamassas de cal aérea (maior rapidez inicial de secagem), face as argamassas estudadas neste trabalho, enquanto as argamassas de cal hidráulica natural “NHL5” apresentam os valores de TS mais baixos.

Em termos de comportamento face à água em termos de secagem e capilaridade, traduzido pelo parâmetro AB, conclui-se que as argamassas de cal aérea em todos os traços volumétricos apresentam valores inferiores aos das argamassas NHL3.5 na mesma cura H, indiciando as argamassas estudadas no presente trabalho um bom comportamento; com a inclusão de Mk o AB aumenta com destaque para as argamassas com traço volumétrico mais forte, mas tal também é registado nas argamassas NHL3.5 (embora com dosagens e níveis de incremento distintos); em termos de cal hidráulica natural “NHL5” esta apresenta menores valores de AB, com ou sem Mk, que as argamassas estudadas.

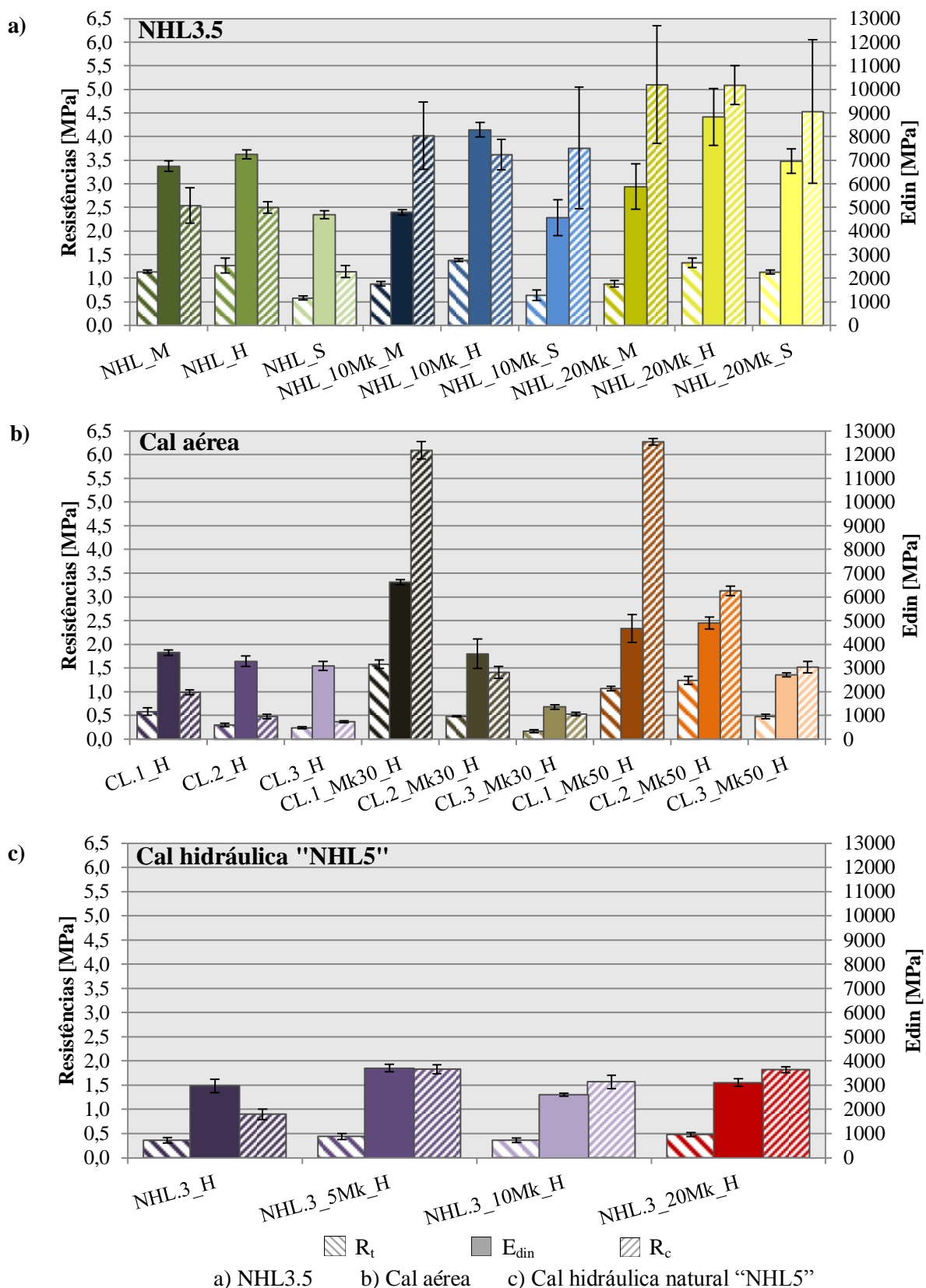
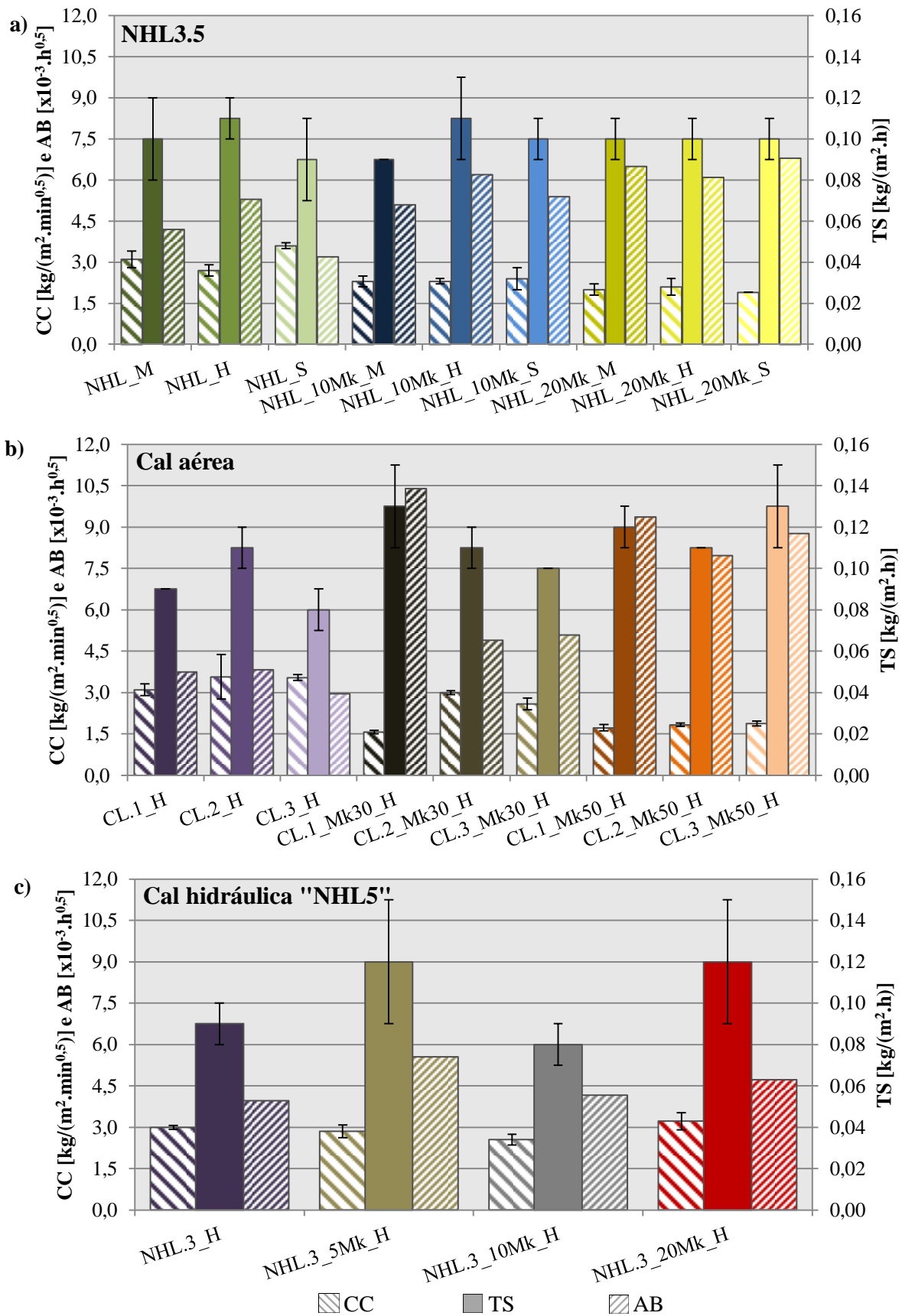


Figura 5.11 – Parâmetros mecânicos das argamassas de cal aérea, cal hidráulica natural "NHL5" e cal NHL3.5 aos 180 dias



a) NHL3.5 b) Cal aérea c) Cal hidráulica natural "NHL5"

Figura 5.12 – Secagem e capilaridade das argamassas de cal aérea, cal hidráulica natural "NHL5" e cal NHL3.5 aos 180 dias

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões gerais

Com o intuito de fazer uma avaliação conclusiva de vários aspetos abordados nesta dissertação, optou-se por dividir as conclusões finais em vários pontos de análise, sintetizando as questões mais importantes.

- Relativamente à análise do estado dos conhecimentos e aos objetivos do trabalho

Existem registos e vestígios arqueológicos que comprovam que civilizações da antiguidade já tinham utilizado a cal aérea com pozolanas para a elaboração de argamassas com características hidráulicas, mas foi na Inglaterra expansionista do séc. XVIII, com a necessidade do endurecimento das argamassas em contato com a água, na construção dos grandes portos, que se deu o desenvolvimento das cais com propriedades hidráulicas. Com o aparecimento do cimento Portland, pouco a pouco o uso das cais na construção em obra foi decaindo.

Hoje em dia e face às condicionantes tecno-económico-ambientais e aos novos desafios e paradigmas do mercado da construção civil, torna-se cada vez mais importante a manutenção, reabilitação e/ou conservação sustentável do parque habitacional. Um dos aspetos a ter em conta nos edifícios são os rebocos das alvenarias, que nalguns casos precisam de reparações localizadas, manutenção preventiva ou mesmo de substituições parciais ou totais, por problemas derivados, quer da envolvente ambiental, quer de deficientes e incorretas aplicações de materiais de construção.

Como tal os rebocos com base em cal hidráulica natural surgem como grande alternativa para a correção de vários problemas quando se pretendem argamassas hidráulicas; sendo a cal hidráulica natural um ligante mais sustentável do ponto de vista ambiental e económico, uma vez que é produzida após a cozedura da matéria-prima a temperaturas inferiores à do cimento, necessitando como tal de menor consumo de energia e produzindo menos emissões de CO₂ correspondente a esse consumo de energia, é de incentivar e incrementar novamente a sua utilização em obra. Por outro lado existe matéria-prima e indústrias nacionais que a podem produzir e exportar, uma vez que poucos países no mundo a produzem.

Com a entrada em vigor da nova versão da norma que rege as cais de construção partiu-se para o estudo das argamassas com base na cal NHL3.5, segundo o produtor uma cal nacional produzida já de acordo com essa norma. O objetivo desta dissertação, inserida nos projetos *FCTMETACAL* e *LIMECONTECH*, passou então pelo estudo das características físicas, mecânicas, químicas e microestruturais de argamassas produzidas com base na cal NHL3.5, da influência de substituições parciais mássicas de cal por metacaulino (10% e 20% de substituição) e também pelo estudo da influência das diferentes condições de curas, nomeadamente cura M (ambiente marítimo), cura H (HR=95 ±5% e T=21±2°C) e cura S (HR=65±5% e T=20±3°C). Desde já é possível afirmar que todos os objetivos foram cumpridos.

- Relativamente aos procedimentos e ensaios adotados na campanha experimental

Para avaliar o comportamento das argamassas foram então realizadas três diferentes argamassas, NHL (argamassa com cal NHL3.5), NHL_10Mk e NHL_20k (argamassas com cal NHL3.5 e com 10% e 20% de substituição por Mk respetivamente). Os ensaios utilizados na campanha experimental foram realizados de acordo com todas as especificações indicadas, sempre que possível com base na normalização existente e foram usados de igual modo nas três idades de ensaio, salvo os casos que se passam a mencionar:

No ensaio de absorção de água por capilaridade nas idades de 28 e 90 dias foi utilizada uma gaze presa com um elástico na base dos provetes em ensaio para evitar que as diferenças de massa ocorressem por perdas de material do provete; uma vez que, quer aos 28, quer aos 90 dias tal facto não se registou, concluiu-se não ser necessário a utilização da gaze, descartando-se mesmo o seu uso aos 180 dias.

O ensaio de resistência aos sulfatos realizado foi baseado numa norma de ensaio para pedra natural [IPQ, 2001], e já tinha sido utilizado em trabalhos anteriores em argamassas [FARIA, 2009]. Embora se tenha utilizado metade da dosagem de sulfatos definida na norma o ensaio revelou-se muito agressivo para as argamassas em estudo, concluindo-se será mais adequado usar um ensaio que seja realizado em condições que traduzam um ataque real como por exemplo o uso de água do mar.

- Relativamente a resultados experimentais

Em termos de resultados obtidos através de ensaios sobre as argamassas frescas foi avaliada a consistência por espalhamento; com os resultados desse ensaio foi possível constatar que o espalhamento diminui com o aumento do teor de Mk na argamassa, isto para uma mesma relação água/ligante nas três argamassas; como tal conclui-se que a inclusão de Mk, diminui a consistência das argamassas.

Para avaliar o comportamento mecânico das argamassas avaliaram-se as resistências à compressão e tração por flexão, e o módulo de elasticidade dinâmico. De uma forma geral as argamassas da cura H, independentemente do teor de Mk, são as que apresentam os maiores valores de resistências mecânicas; em grande parte essa situação deve ser devida aos compostos hidratados que se formam (monocarboaluminatos e hidrocalumite), muito importantes para o desenvolvimento das resistências mecânicas, devido à hidratação da belite e aluminatos de cálcio, havendo, no caso das argamassas com Mk, de destacar também a existência de vaterite, composto originado pela reação pozolânica potenciada pelo ambiente de elevada HR; conclui-se também pelas análises XRD e TGA, que os valores de resistências sofrem aumentos com a idade devido à continuação da reação pozolânica, e consumo de portlandite, e à hidratação da belite. Já as argamassas da cura S apresentam os menores valores de resistências mecânicas, devido à predominância da reação de carbonatação sobre a reação de hidratação, confirmado pela análise TGA, e como tal maior lentidão na hidratação da belite e na reação pozolânica, o que leva a que os compostos hidráulicos importantes para o

desenvolvimento das resistências mecânicas não tenham tanta proporção como nas argamassas da cura H; com a idade estas argamassas tendem a não ter grandes aumentos, apresentando valores estáveis. A cura M em ambiente exterior, apresenta-se com valores intermédios entre a cura H e S.

O ensaio de resistência aos sulfatos realizado permite observar tendências entre as argamassas. Com este ensaio observa-se que as argamassas com Mk são as que oferecem menos resistência aos ciclos de sulfatos, principalmente as de 10%Mk aos 28 dias, registando grandes perdas de massa. Na situação oposta estão as argamassas sem Mk, apresentando um bom comportamento e resistindo melhor aos ciclos. De assinalar também que não se registam tendências entre as curas. A análise XRD permite constatar a formação do composto etringite, composto expansivo, com maior enfoque nas argamassas com 10%Mk, o que não acontece nas argamassas sem Mk, concluindo-se assim que a etringite é a principal responsável pelo mau comportamento das argamassas com Mk nos ciclos de resistência aos sulfatos. Também a estrutura porosa e nomeadamente a diferente dimensão dos poros registada nas argamassas sem e com Mk pode em parte também justificar esta diferença de comportamentos.

A avaliação da porosidade das argamassas foi alvo de estudo por dois métodos: a porosimetria de mercúrio e o método hidrostático. Ambos apresentaram valores semelhantes de MVA e P_{ab} , o que leva a concluir que o método hidrostático é um bom método de ensaio a utilizar quando se pretendem informações acerca da porosidade aberta das argamassas. Os valores de P_{ab} foram na generalidade idênticos entre as curas e com tendências de decrescer com a idade e a crescer com o teor de Mk. Por oposição evoluíram os valores de MVA com valores idênticos entre curas mas com tendências a crescer com a idade e a decrescer com o Mk, o que leva a concluir que a inclusão Mk aumenta ligeiramente a P_{ab} e, como tal, diminui também ligeiramente a MVA.

Em termos de comportamento face à água observou-se a absorção de água por capilaridade e a secagem das argamassas. Para avaliar esse comportamento estudaram-se, na absorção de água por capilaridade, os parâmetros CC e VA, e na secagem os parâmetros TS e IS; com intuito de cruzar os primeiros momentos da absorção de água e da secagem, foi estabelecido um novo parâmetro, o parâmetro comportamento à água AB. Em termos gerais os valores de VA e IS foram semelhantes em todas as curas, fazendo-se a distinção apenas pelos teores de Mk e idade (evolução decrescente); com os teores crescentes de Mk, os valores de VA apresentam uma evolução ligeiramente crescente, tal como os valores de IS e P_{ab} , concluindo-se assim que valores menores de P_{ab} propiciam argamassas com menor absorção total de água e com grande capacidade para secar. O parâmetro AB não destaca em nenhuma das curas, registando um aumento com o teor de Mk e decréscimo com a idade; constata-se através de AB que as argamassas com valores de CC mais elevados apresentam TS mais pequenas, resultando tal facto em valores de AB mais baixos; conclui-se assim que o parâmetro mais importante para definir o comportamento com a água é o CC, e como tal as argamassas NHL_20Mk apresentam os melhores valores de AB, em oposição às argamassas sem Mk.

- Relativamente à aplicação das argamassas

Em termos de aplicação das argamassas estudadas neste trabalho conclui-se que, no caso de aplicação em edifícios antigos, nenhuma argamassa cumpre o requisitado por Veiga (2010); no entanto, excluindo o restrito intervalo de valores de CC, a argamassa NHL_S é passível de ser utilizada em rebocos ou no refechamento de juntas. Tendo a cura desta argamassa sido realizada a uma HR constante de 65%, é provável que condições reais de aplicação em ambiente não tão húmido como o da cura M conduzam a argamassas só de NHL3.5 adequadas para aplicação em reboco ou refechamento de juntas de edifícios antigos. Ao nível de argamassas ditas para rebocos gerais interiores e exteriores, concluiu-se que todas as argamassas deste trabalho podem ser utilizadas.

Uma vez que as argamassas deste trabalho se encontram de uma maneira geral situadas entre os requisitos de Veiga e os da norma EN 998-1:2010, pode concluir-se que estas são adequadas para utilização na reabilitação das fachadas de edifícios existentes e mesmos dos recentes.

Em suma e de forma geral, a inclusão do metacaulino nas argamassas melhora as suas características mecânicas com relevância para a substituição de 10%Mk (uma vez que para 20%Mk os valores são demasiado elevados para reabilitação de edifícios antigos) tal como a cura H que potencia as reações hidráulicas, melhorando assim também as características mecânicas das argamassas. Ao nível de comportamento face à água, as argamassas com a cal NHL3.5 apresentam bons comportamentos e estes são otimizados com a inclusão de Mk.

No âmbito do desenvolvimento deste trabalho foram produzidos dois pósteres que se podem encontrar no anexo VI, *Influência da percentagem de metacaulino em argamassas de cal NHL3.5 a idade jovem*, exposto na 2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono - CRSSEL 2012, [GRILO, J. & FARIA, P., 2012a] e *Influência da cura e da percentagem de metacaulino em idades jovens de argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5*, exposto na Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria - CIRea 2012, [GRILO, J & FARIA, P., 2012b]. Parte dos resultados deste trabalho foram também publicados em dois artigos de que o signatário é co-autor e que foram apresentados e publicados em conferências internacionais: *Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural*, na conferência CIRea 2012 [FARIA *et al.*, 2012a] e *Lime based mortars for ceramic tile application: the influence of the lime, the use of metakaolin and the curing*, no congresso internacional AZULEJAR 2012, [FARIA *et al.*, 2012c]. Estão também a ser preparados pelo signatário dois artigos científicos para submeter a revistas internacionais, um deles incidindo mais sobre a caracterização química e mineralógica e outro dando maior enfoque às características de funcionamento das argamassas, nomeadamente o comportamento face à água.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

Finalizado o trabalho, considera-se ser de interesse futuro a continuação do desenvolvimento de trabalhos na continuação do apresentado com os seguintes pressupostos:

- Aprofundar o estudo sobre o parâmetro AB (*Aqua Behaviour*) que relaciona a secagem com a absorção de água.
- Avaliar o comportamento deste tipo de argamassas com substituição mássica de cal por percentagens inferiores de metacaulino, nomeadamente 2,5% e 5%.
- A avaliação do comportamento deste tipo de argamassas aplicadas diretamente sobre suportes reais e nomeadamente do seu comportamento à fendilhação, aderência e permeabilidade à água sobre baixa pressão, assim como a comparação de algumas características microestruturais e outras com a avaliação realizada em laboratório.
- Avaliar o comportamento deste tipo de argamassas face a um ensaio de resistência aos sulfatos que simule um ataque de sulfatos e cloretos mais real, com água do mar.
- Avaliar o comportamento deste tipo de argamassas com um traço mais fraco em ligante (nomeadamente ao traço volumétrico 1:4).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGGELAKOPOULOU, E.; BAKOLAS, A. & MOROPOULOU, A. (2011). *Properties of lime-metakolin mortars for the restoration of historic masonries*. Applied Clay Science, volume 53, págs 15-19, Elsevier.
- ALLEN, G. & BALL, R. (2010). *Mechanical Properties of Hydraulic Lime Mortars*. In 3º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- ALVAREZ, J.; SEQUEIRA, C. & COSTA, M. (2005). *Ensinamentos a retirar do passado histórico das argamassas*. In 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- ALMEIDA, N.G.; FARIA, P. & PINTO, A.P. (2008) – *Lime mortars with rice husk ash for ancient masonry*. In HMC08 - Historic Mortars Conference. Lisboa, LNEC.
- BANDEIRA, A. (2012). *Caracterização de argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com metacaulino. Evolução com a idade*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil Construção, Lisboa, FCT-UNL
- BESSEY, G. (1966). *Current developments affecting the design and use of mortars for building purposes*. Journal of Applied Chemistry, volume 16, pág. 33.
- BRUNO, P & FARIA, P. (2008). *Earth mortars constructive use on neolithic domestic structures. Some case studies in Alentejo, Portugal*. Conservar Património, Volume 8, págs. 5-12, Associação Profissional de Conservadores-Restauradores de Portugal (ARP).
- CACHIM, P.; VELOSA, A. L. & ROCHA, F. (2010). *Effect of Portuguese metakaolin on hydraulic lime concrete using different curing condition*. Construction and Building Materials, volume 24, págs. 71-78. Elsevier Ltd.
- CARNEIRO, J (2012). *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil Construção, Lisboa, FCT-UNL.
- CHATTERJEE, A., K. (2000). “X-ray diffraction”. In *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*, págs. 275-332, William Andrew Publishing, LLC.
- CINCOTTO, M. A.; REPETTE, W.; QUARCIONI, V. & JOHN, V. (2010). *O Efeito da carbonatação na porosidade de argamassas de cimento, cal e cimento: cal*. In 3º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- CIZER, Ö. (2009) *Competition between carbonation and hydration on the hardening of calcium hydroxide and calcium silicate binders*. PhD Thesis in Civil Engineering, Leuven, Catholic University of Leuven.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) (2001). EN 459-1 - *Building lime. Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria*. Brussels, CEN.
- CEN (2002). EN 1015-18:2002 - *Methods of test for mortar for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*. Brussels, CEN.

- CEN (1998/2006). EN 1015-2:1998/A1:2006 - *Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. Brussels, CEN.
- CEN (1999/2006). EN 1015-11:1999/A1:2006 - *Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. Brussels, CEN.
- CEN (1999/2004/2006). EN 1015-3:1999/A1:2004/A2:2006 - *Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. Brussel, CEN.
- CEN (2009). EN 15801:2009 - *Conservation of cultural property. Test, methods. Determination of water absorption by capilarity*. Brussels, CEN.
- CEN (2010). EN 459-1 - *Building lime. Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria..* Brussels, CEN.
- CEN (2010). EN 998-1 – *Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar*. Brussels, CEN.
- DONATELLO, S., TYRER, C. R. & CHEESEMAN (2010). *Comparison of the test methods to asses pozzolanic activity*. Cement and Concrete Research, volume 32, págs. 121–127. Elsevier.
- FARIA-RODRIGUES, M. P. (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas – contributo para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Lisboa, FCT-UNL.
- FARIA, P.; HENRIQUES, F. & RATO, V. (2007). *Argamassas Correntes: Influência do tipo de ligante e do agregado*. In 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- FARIA, P; HENRIQUES, F. & RATO, V. (2008). *Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation*. Cultural Heritage, volume 9, págs 338-346. Elsevier.
- 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, págs.99-110. C.Groot (ed).
- FARIA, P. (2011). *PROJECTO FCTMETACAL - Procedimentos de ensaio de argamassas*. Departamento Engenharia. Civil, FCT-UNL.
- FARIA, P.; SILVA, V.; GRILO, J.; CARNEIRO, J.; BRANCO, T.; MERGULHÃO, D. & ANTUNES, R. (2012a). *Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural*. In CIREa - Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas de Antigas de Alvenaria, pág. 31-40, UNL, Lisboa.
- FARIA, P.; SILVA, V. & FLORES-COHEN, I. (2012b). *Argamassas de cal hidráulica natural e pozolanas artificiais: avaliação laboratorial*. In. 4º Congresso Nacional de Argamassas e ETICS, Lisboa.
- FARIA, P.; SILVA, V.; GRILO, J.; BANDEIRA, A.; CARNEIRO, J.; BRANCO, T. & MERGULHÃO, D. (2012c). *Lime based mortars for ceramic tile application: the influence of the lime, the use of metakaolin and the curing*. In congresso internacional AZULEJAR 2012, Aveiro.
- GANHÃO, A. M. (2011). *Construção sustentável – proposta de melhoria da eficiência energética em edifícios de habitação*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil Construção, Lisboa, FCT-UNL.

- GAMEIRO, A.; SANTOS-SILVA, A.; VEIGA, R. & VELOSA, A. (2012). *Hydration products of lime-metakaolin pastes at ambient temperature with ageing*. *Thermochimica Acta*, volume 535, págs. 36-41. Elsevier.
- GUERREIRO, C.; HENRIQUES, F. & PINTO, A. (2007). *Análise comparativa de Argamassas de cal aérea, medianamente hidráulicas e de ligantes mistos para rebocos de edifícios antigos*. In 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- GULOTTA, D.; GOIDANICH, S.; TEDESCHI, C.; NIJLAND, T & TONIOLO, L. (2013). *Comercial NHL-containig mortars for the preservation of historical architecture. Part 1: Compositional and mechanical characterization*. *Construction and Building Materials*, volume 38, págs. 31-42. Elsevier.
- GRILO, J & FARIA, P. (2012a). *Influência da percentagem de metacaulino em argamassas de cal NHL3.5 a idade jovem*. In 2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono - CRSSEL 2012, FCT-UNL, Almada.
- GRILO, J & FARIA, P. (2012b). *Influência da cura e da percentagem de metacaulino em idades jovens de argamassas de cal hidráulica natural NHL3*. In CIRea - Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas de Antigas de Alvenaria, UNL, Lisboa.
- HENRIQUES, F. (1994). *Humidade em Paredes*. In Coleção Edifícios. Lisboa, LNEC.
- HENRIQUES, F. & FARIA, P. (2008). *O papel da investigação no estudo das argamassas de substituição na conservação do património*. *Revista Engenharia Civil*, número 31, págs. 29- 37, Universidade do Minho
- INSTITUTO PORTUGÊS DA QUALIDADE (IPQ) (2000). NP EN 933-1:2000 - *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica. Método da peneiração*. Almada, IPQ.
- IPQ (2001). NP EN 12370:2001- *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à cristalização de sais*. Almada, IPQ.
- IPQ (2002a). NP EN 459-1 – *Cal de construção. Parte 1: definições, especificações e critérios de conformidade*. Almada, IPQ.
- IPQ (2002b). NP EN 1097-3:2002 - *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios*. Almada, IPQ.
- IPQ (2006). NP EN 14146:2006 - *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)*. Almada, IPQ.
- IPQ (2008). NP EN 1936 – *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. Almada, IPQ.
- IPQ (2011). NP EN 459-1 – *Cal de construção. Parte 1: definições, especificações e critérios de conformidade*. Almada, IPQ.
- LANAS, J. & ALVAREZ, J. (2003). *Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behaviour*. *Cement and Concrete Research*, volume 33, págs. 1867–1876. Elsevier.
- LANAS, J., PÉREZ-BERNAL, J. L., BELLO, M. A. & ALVAREZ-GALINDO, J. I. (2004). *Mechanical propertier of natural hydraulic lime-based*. *Cement and Concrete Research*, volume 37, págs. 2191-2201. Elsevier.

- LAWRENCE, R. M.; MAYS, T.; RIGBY, S. WALKER, P. & D'AYALA, D. (2007). *Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars*. Cement and Concrete Research, volume 37, págs. 1059-1069. Elsevier.
- MACIEL, M. (2009). *Vitrúvio - Tratado de Arquitectura*. Lisboa, ISTPress
- MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; PUERTAS, F. & BLANCO VARELA, M. T. (1995). *Carbonation process and properties of a new lime mortar with added sepiolite*. Cement and Concrete Research, volume 25, págs. 39-50. Elsevier.
- MASSENA, R. (2011). *Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino em exposição natural*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil Construção, Lisboa, FCT-UNL.
- MELO, K. A. & CARNEIRO, A. M. (2010). *Effect of metakaolin's finesses and content in self-consolidating concrete*. Construction and Building Materials, volume 24, págs. 1529-1535. Elsevier
- MOSQUERA, M.; SILVA, B.; PRIETO, B. & RUIZ-HERRERA, E. (2006). *Addition of cement to lime-based mortars: Effect on pore structure and vapour transport*. Cement and Concrete Research, volume 36, págs. 1635–1642. Elsevier.
- MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A e AGGELAKOPOULOU, E. (2004). *Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis*. Thermochemica Acta, volume 420, págs. 135–140. Elsevier.
- NÓBREGA, A.; SOUSA, J.; MARINHO, M. & CARNEIRO, A. (2010). *Estudo das propriedades de argamassas de cal e pozolana: influência do tipo de metacaulim*. In 3º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- PADILHA, A. F. (2000). *Materiais de engenharia*. Curitiba, Hemus
- RAMACHANDRAN, V.; PAROLLI, R.; BEAUDOIN, J.; DELGADO, A. (2002). *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*. Otava, William Andrew Publishing/Noyes.
- RATO, V. (2006). *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Lisboa, FCT-UNL.
- RILEM TC 25-PEM. (1980). *Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test nº II.5 - Evaporation curve*. Materials & Structures, volume 13 nº. 75, pág. 205 a 207, Paris.
- STEFANIDOU, M. (2010). *Methods for porosity measurement in lime-based mortars*. Construction and Building Materials, volume 24, págs. 2572-2578. Elsevier.
- SAID-MANSOUR, M.; KADRI, E.; KENAI, S.; GHRICI, M. & BENNACEUR, R. (2011). *Influence of calcined kaolin on mortar properties*. Construction and Building Materials, volume 25, págs. 2275-2282. Elsevier.
- SAMPAIO, J.; COUTINHO, J. & SAMPAIO, M. (2001). *Melhoria do desempenho de betões pelo metacaulino*. In 43º Congresso Brasileiro do Concreto. Paraná.

SANTOS-SILVA, A. (2005). *Degradação do betão por reações álcalis-sílica. Utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua Prevenção*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Guimarães, Universidades do Minho.

SANTOS-SILVA, A. (2011). *Adição de metacaulino em betão – efeitos sobre a durabilidade* In Atas do Seminário: Metacaulino em Portugal - Produção, Aplicação e Sustentabilidade, Universidade de Aveiro (em fase de publicação).

SEQUEIRA, A.; FRADE, D. & GONÇALVES, P. (2007). *Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.

SOUSA-COUTINHO, A. (1988a). *Fabrico e propriedades do betão - Volume I*, Lisboa, LNEC.

SOUSA-COUTINHO, A. (1988b). *Fabrico e propriedades do betão - Volume III*, Lisboa, LNEC.

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, volume 31, págs. 22-28. Elsevier.

VELOSA, A. (2006). *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Aveiro, Universidade de Aveiro.

VEIGA, R. (2006). *Comportamento de rebocos para edifícios antigos: exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos*. In Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos. Lisboa, LNEC.

VEIGA, R.; VELOSA, A. & MAGALHÃES, A. (2009). *Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation*. Construction and Building Materials, volume 23, págs. 318-327. Elsevier.

VEIGA, R., FRAGATA, A., VELOSA, A. L., MAGALHÃES, A. C. & MARGALHA, G. (2010). *Lime-based mortars: Viability for use as substitution renders in historical buildings*. International Journal of Architectural Heritage, volume 4, págs. 177-195. Taylor & Francis.

ANEXOS

Anexo I – Ficha técnica da cal NHL3.5



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 459-1:2010.

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 the only binder or mixed with other hydraulic or non-hydraulic 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 ± 0,06	EN 459-1	
Density (g/cm ³)	2,7	-	
Fineness (%)	90 µm ≤ 15,0 200 µm ≤ 2,0	EN 459-1	
Blaine (cm ³ /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) (%)	≥ 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 bedding mortars Secil NATURAL LIME NHL 3.5, has an important role as only binder or mixed with others.

Previously mix the Secil NATURAL LIME NHL 3,5 with the aggregate and afterwards add water in the necessary amount in order to obtain a good workability. As an indicative value, please use a water/binder ratio of 0,6 expressed by volume.

Secil Argamassas

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



www.secilmartinganca.pt

Secil NATURAL LIME NHL 3,5

NHL 3,5 - NATURAL HYDRAULIC LIME



Stone Quarry



Lime Kilns



Burnt limestone

Complementary Advice

- ▶ Excess of water in the mixture is prejudicial to the physical properties of the render;
- ▶ Always use the minimum amount of water necessary to ensure a good workability;
- ▶ The mixing water must be free of any impurities (clay, organic material), whenever possible, tap water must be used;
- ▶ Once the mortar ratio is determined, keep the dosage and mixing times constant.

Restrictions

Do not apply mortars to temperatures below 5°C and over 30°C, avoiding application in strong winds or high solar exposure.

Do not use softened mortars or that have initiated their setting time.

Avoid rapid drying of the mortars, spraying the substrate 1 or 2 hours before application, and spraying again as soon as the mortars show sufficient resistance. Repeat this procedure 1, 2 and 7 days after.

5. HYGIENE AND SAFETY

(DOES NOT DISMISS CONSULTATION OF THE PRODUCT SAFETY FILE)

- ▶ May cause skin irritation;
- ▶ May cause severe eye damage;
- ▶ May cause respiratory irritation;
- ▶ Keep away from children ;
- ▶ Use protective gloves/ garments /eye protection / facial protection;
- ▶ **If in contact with eyes:** wash carefully with water for several minutes. Seek immediate medical advice;
- ▶ **If in contact with skin:** wash thoroughly with water and soap;
- ▶ Do not breathe dust / vapours;
- ▶ Remove patient to fresh air and keep at rest in a position comfortable for breathing;
- ▶ Dispose of content / packaging according to legislation in force.

6. PACKAGING AND VALIDITY

Packaging

- ▶ 25 kg bags on plastified pallets
- ▶ In bulk, for use in silo systems

Validity

Secil Natural Hydraulic Lime must be transported, handled and stored in its original packaging (should only be opened for immediate use), away from humidity and exposure to heat.

In these conditions are respected, it can be stored for a **12 month** limit

Once the application conditions of our products are beyond our reach, we will not be held responsible for its incorrect usage. It is the client's duty to verify the suitability of the product for the predicted use. In any case, our responsibility is limited to the value of goods supplied. The information shown on this file may be changed without previous notice. In case of doubt, and if you should need any additional information, please contact our technical services.

Draft Version October 2011
TC.E.085.0

Secil Argamassas

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



www.secilmartinganca.pt

Secil NATURAL LIME NHL 3,5

NHL 3,5 - NATURAL HYDRAULIC LIME



DESIGNATION: Secil NATURAL LIME NHL 3,5
REFERENCE STANDARD: EN 459-1:2010

PREDICTED USE: Preparation of binder for mortars, production of other construction products and civil engineering uses.

Produced by Secil Martingança, S.A., whose Quality Management System is certified by APCER with the n° 2003/CEP.2132

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.
Apoio ao Cliente: Apartado 2 | 2406 - 909 - Maceira - LRA - Portugal
Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilmartinganca.pt



www.secilmartinganca.pt

Anexo II – Ficha técnica do metacaulino

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'emportent 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 %

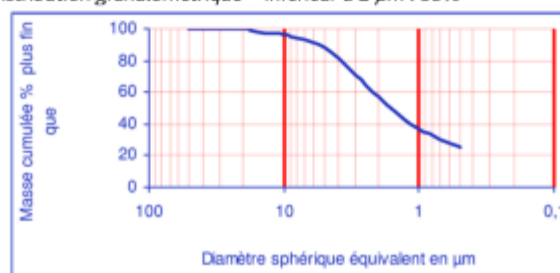
TYPICAL PHYSICAL CHARACTERISTICS

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	
Loose / Non tassé	250 kg/m ³
Tamped / Tassé	400 kg/m ³

SIEVE ANALYSIS

Distribution granulométrique – Inférieur à 2 µm : 55%



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

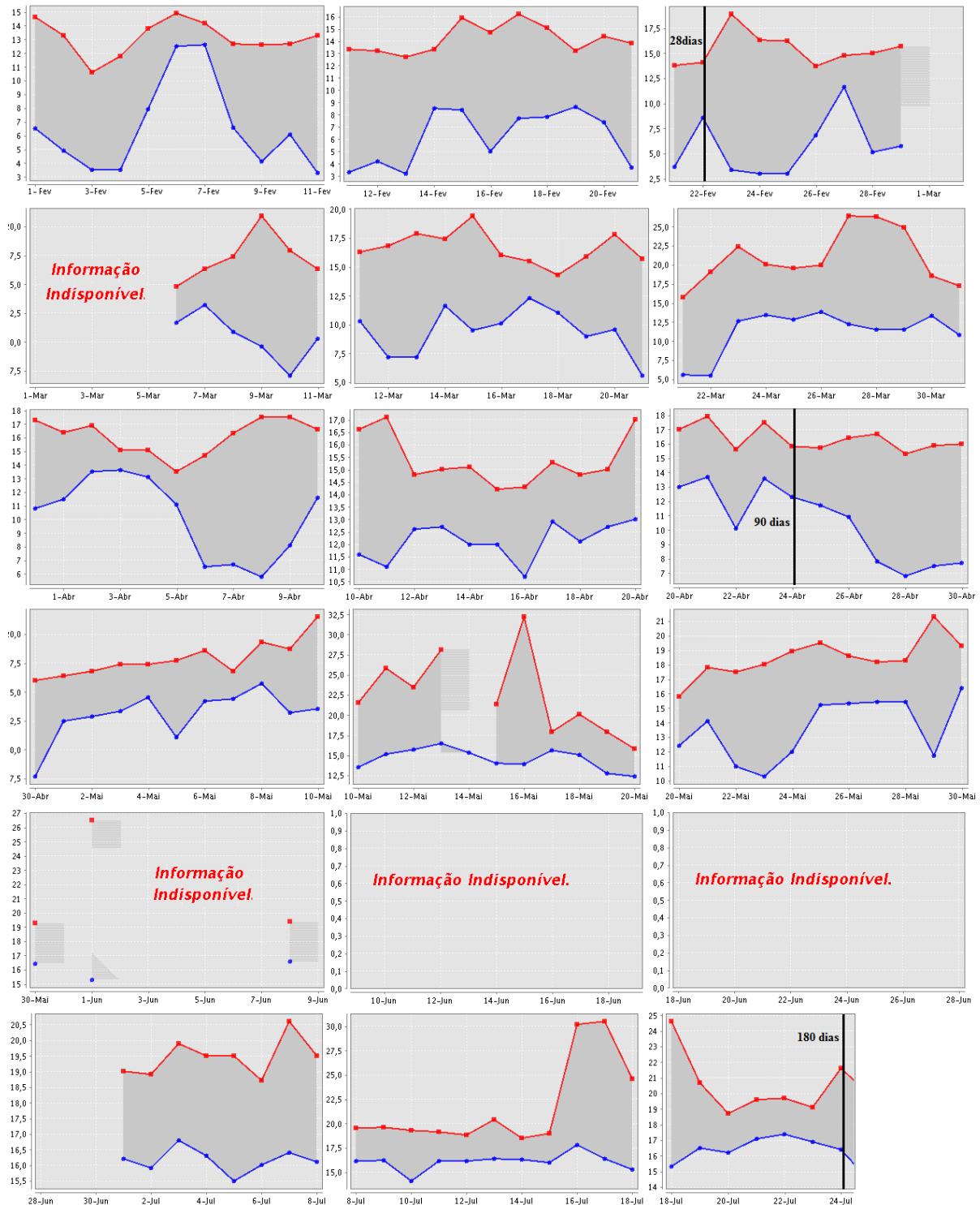
Revision 4 – 2008/07/24



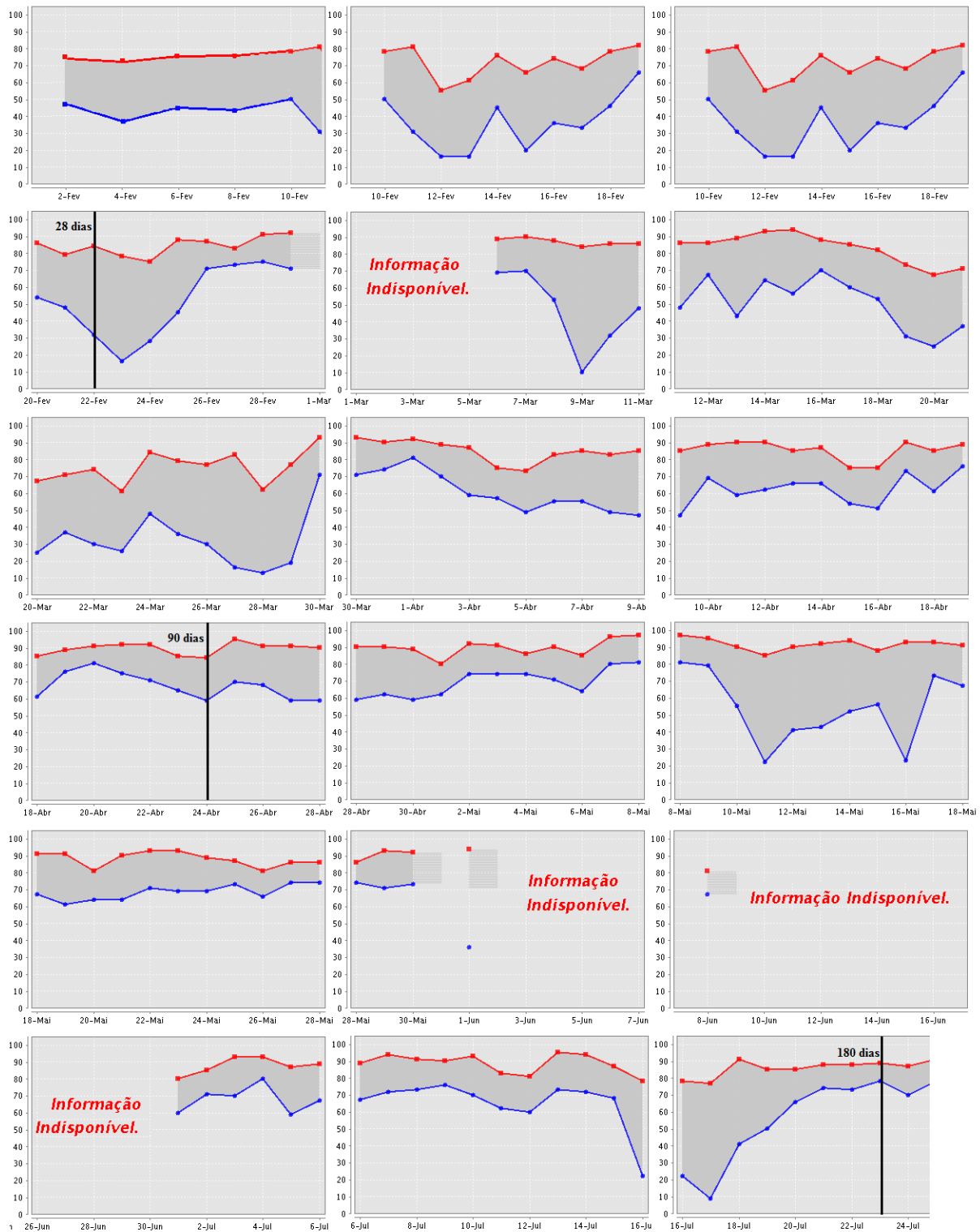
Anexo III – Dados climáticos do ambiente de cura marítima

Informações obtidas do site do Instituto de Meteorologia de Portugal, acedido ao longo dos 180 dias de cura no link: <https://www.meteo.pt/pt/otempo/graficosobservacao/obsDiariosHistorico.jsp>

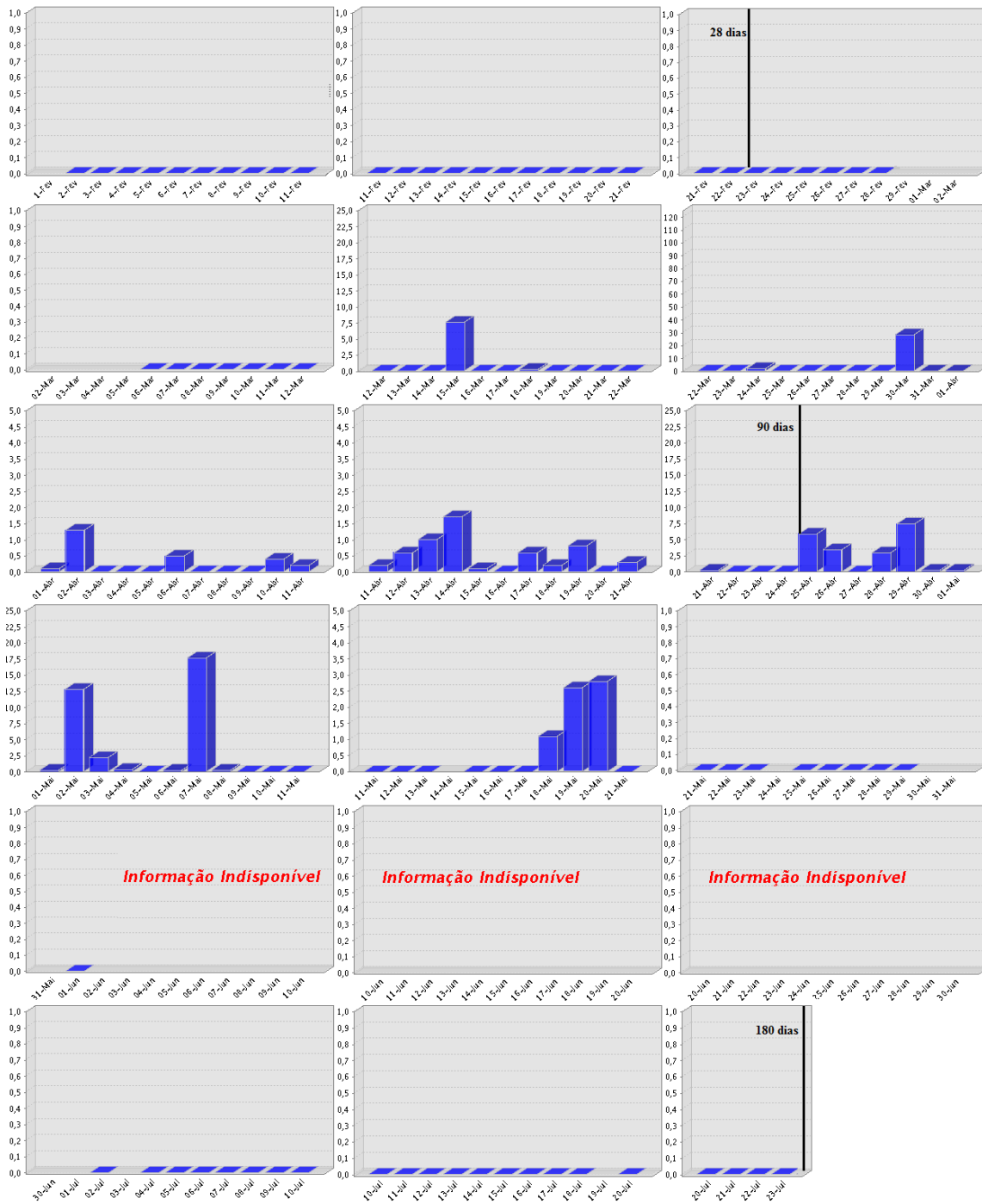
- Temperatura



- Humidade relativa

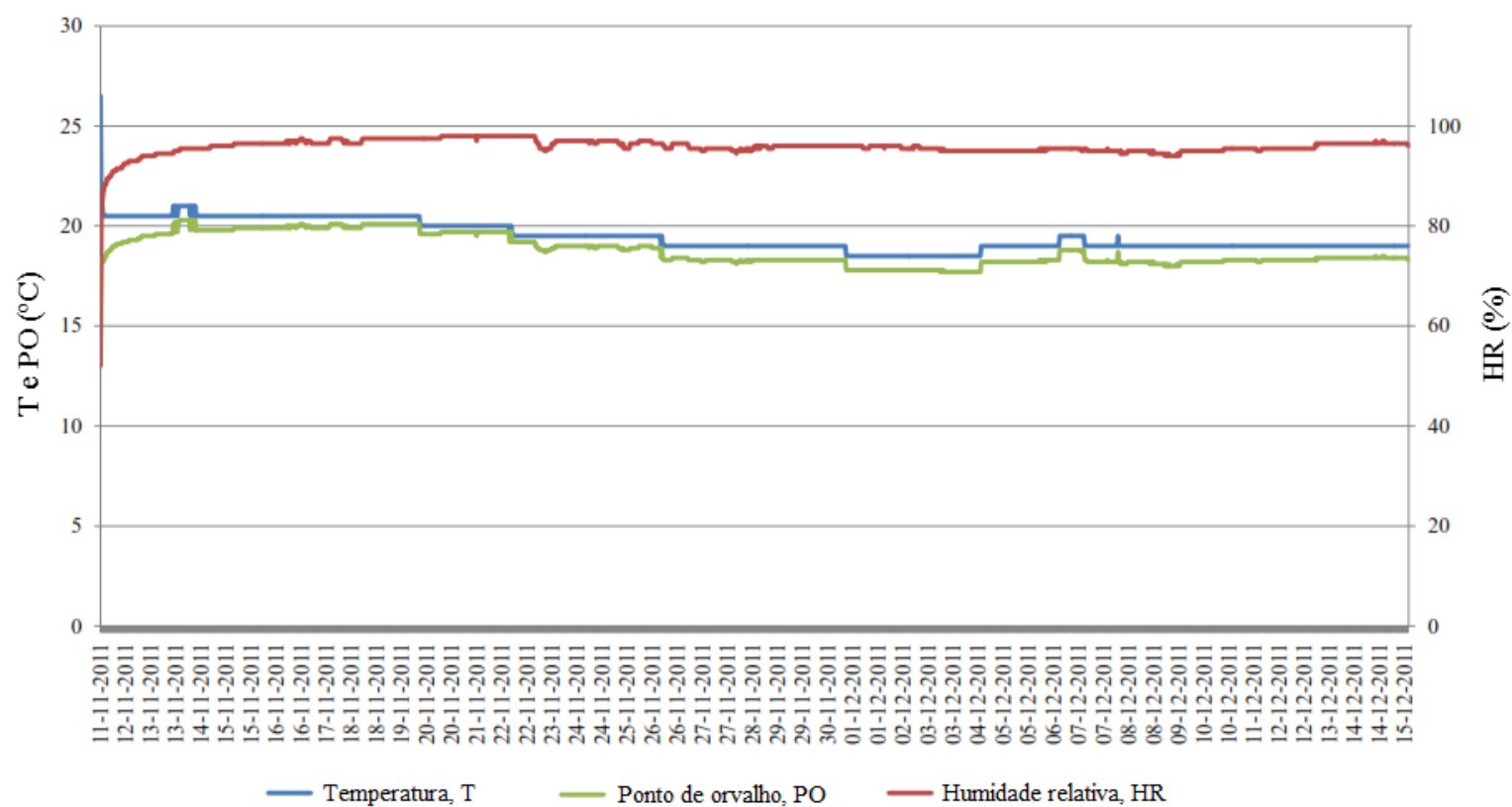


- Precipitação



Anexo IV – Dados climáticos da câmara de cura húmida

Devido a uma avaria no aparelho que registava as condições de T e HR na câmara da cura húmida não existem medições no período em que decorreu a cura dos provetes (1 de fevereiro a 23 de julho de 2012). Apesar do gráfico apresentado não ser referente à data em que ocorreu a cura destes serve apenas para mostrar os valores que se podem considerar como correntes na câmara húmida.



Anexo V – Resultados individuais de ensaios realizados**Quadro V.1 – Espalhamento de cada argamassa**

Argamassa	Espalhamento [mm]			
	Esp 1	Esp 2	Méd	DP
NHL_M	150	153	152	2
NHL_H	154	152	153	1
NHL_S	153	152	153	1
NHL_10Mk_M	145	150	148	3
NHL_10Mk_H	150	152	151	1
NHL_10Mk_S	147	148	148	1
NHL_20Mk_M	142	143	143	1
NHL_20Mk_H	143	140	142	2
NHL_20Mk_S	144	143	144	1

Quadro V.2 – Módulo de elasticidade dinâmico dos provetes de todas as argamassas, 28 dias

Argamassa	Provete	Massa [g]	E_{din} [MPa]								E_{din} [MPa]	
			E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	Méd	DP
NHL_M	GM11	470,209	4037	4066	4068	4243					4104	94
	GM12	469,792	4197	4106	4145	4211	4367				4205	100
	GM13	472,988	4011	3979	4311	4025	4330	4030			4114	161
NHL_H	GH21	468,686	5226	5191	5236	5232					5221	21
	GH22	476,801	5304	5331	4266	4278					4795	604
	GH33	479,114	5779	5274	5748	5306					5527	274
NHL_S	GS31	472,485	4177	4198	4185	4230					4198	23
	GS32	467,451	4034	4008	4078	4015					4034	31
	GS33	466,822	4018	4106	4044	4029					4049	39
NHL_10Mk_M	GM41	470,353	5515	5527	5731	5437	5822				5606	162
	GM42	478,643	5414	5483	5486	5420					5451	39
	GM43	472,953	5274	5291	5247	5289					5275	20
NHL_10Mk_H	GH51	491,957	1540	1584	9011	9098	8957	9064	9599	9381	9146	3535
	GH52	496,939	2394	1089	1103	1594	1092	1061	1537	1058	1366	470
	GH53	486,349	1339	1191	1674	1045	1498				1349	248
NHL_10Mk_S	GS61	471,350	4847	4733	4759	4644					4746	84
	GS62	473,109	5900	5925	5853	5931					5902	35
	GS63	474,618	4222	4323	4089	4185					4205	97
NHL_20Mk_M	GM71	473,104	9183	9172	9206	9215					9194	20
	GM72	479,989	8816	8845	8769	8750					8795	43
	GM73	477,957	8744	8654	8724	8768					8723	49
NHL_20Mk_H	GH81	502,500	13324	13329	13359						13337	19
	GH82	505,557	13950	13642							13796	218
	GH83	503,046	9388	12686	12611						11562	1883
NHL_20Mk_S	GS91	493,451	8048	8010	7996	7998	8007				8012	21
	GS92	492,341	7738	7643	7741	7719					7710	46
	GS93	493,187	7409	7437	7491	7455					7448	34

1540 – Valores não considerados por estarem fora da gama

Quadro V.3 – Módulo de elasticidade dinâmico dos provetes de todas as argamassas, 90 dias

Argamassa	Provete	Massa [g]	E_{din} [MPa]									E_{din} [MPa]	
			E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	Méd	DP
NHL_M	GM14	479,207	6397	6358	6369	6385						6377	17
	GM15	471,134	6282	6231	6321	6276						6278	37
	GM16	483,549	6736	6844	6722	6705						6752	63
NHL_H	GH24	478,634	7055	6969	6730	6716						6868	171
	GH25	473,753	6649	7145	7159	7152						7026	252
	GH26	470,828	7028	7062	7055	7069						7054	18
NHL_S	GS34	474,396	4175	4186	4228	4270						4215	43
	GS35	476,047	4442	4516	4480	4475						4478	30
	GS36	476,083	4676	4656	4575	4687						4649	51
NHL_10Mk_M	GM44	476,355	4913	5014	5062	5147	5274	5773	5781	5824	5071	5318	369
	GM45	474,735	6043	5979	6054	5970						6012	43
	GM46	475,148	5230	5373	5394	5444	5897					5468	253
NHL_10Mk_H	GH54	475,385	9262	9303	9180	9247						7493	51
	GH55	481,88	10726	10692	10678							10699	25
	GH56	482,565	8088	8533	8536							8386	258
NHL_10Mk_S	GS64	473,122	4521	4437	4574	4558	4159	3936	3952	3884	3644	4185	348
	GS65	468,956	4435	4632	4573	4064	4603	3850	3906	3910	3778	4195	359
	GS66	473,488	4273	4225	4207	4225	4678	4482	4715	4443		4406	207
NHL_20Mk_M	GM74	469,120	7042	7028	7065	7035	8401	7693	8092	7778		7517	549
	GM75	466,523	6349	6345	6368	6378	8591	7463	7656	7221		7046	832
	GM76	469,482	7012	6999	6897	6955	7793	7704	7405	7223		7249	350
NHL_20Mk_H	GH84	499,874	13039	13057	13058	13014						13042	21
	GH85	491,064	11042	11086	11096	11073						11074	23
	GH86	495,914	11586	11372	11410	11493						11465	95
NHL_20Mk_S	GS94	466,127	8198	9828	9812	8161						9000	947
	GS95	467,165	8185	8186	8213	8163						8187	20
	GS96	465,545	8129	8202	7438	8065						7959	351

Quadro V.4 – Módulo de elasticidade dinâmico dos provetes de todas as argamassas, 180 dias

Argamassa	Provete	Massa [g]	E_{din} [MPa]									E_{din} [MPa]	
			E_1			E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	Méd	DP
NHL_M	GM17	483,61	6759	6844	6858	6875						6834	52
	GM19	479,17	6492	6466	6413	6426						6449	36
	GM110	481,96	6975	6935	6942	6964						6954	19
NHL_H	GH27	476,82	7424	7418	7441	7430						7428	10
	GH28	476,63	7050	7083	7046	7055						7059	17
	GH29	*Provete partido											
NHL_S	GS37	477,58	4777	4772	4774	4811						4784	18
	GS38	474,91	4800	4786	4851	4875						4828	42
	GS39	474,03	4419	4438	4504	4517						4470	48
NHL_10Mk_M	GM47	476,08	4898	4785	4855	4844						4846	47
	GM48	463,2	4713	4863	4914	4919						4852	96
	GM49	462,69	4620	4618	4708	4713						4665	53
NHL_10Mk_H	GH57	482,34	8517	8514	8556	8539						6922	20
	GH58	486,01	7874	7867	7871	7880						7873	5
	GH59	486,49	8440	8461	8447	8450						8450	9
NHL_10Mk_S	GS67	468,22	4719	4098	4087	3960	3939	4767	4811	4743		4391	400
	GS68	472,9	4496	4436	4474	4496	6581	5923	5514	5910		5229	856
	GS69	467,66	3530	3651	3749	3734	4572	4495	4308	4411		4056	429
NHL_20Mk_M	GM77	466,83	4997	5069	5063	5007	8240	6521	6172	7609	7287	6218	1268
	GM78	465,81	5015	4984	5025	5016	7033	6503	6496	5812		5736	842
	GM79	464,54	5056	4988	5055	5123	6355	6321	6006	6123		5628	623
NHL_20Mk_H	GH87	475,87	8603	8631	8604	8646	9702	10819	10357	10558		9490	980
	GH88	481,35	7768	7773	7744	7717	9868	9855	9903	9846		8809	1132
	GH89	479,65	7054	7069	7049	7034	9932	9625	8756	8970		8186	1265
NHL_20Mk_S	GS97	475,01	5076	5117	5088	5060	6938	7078	6941	7016		6039	1021
	GS98	477,38	4946	4966	4787	4897	6650	6628	6439	6789		5763	930
	GS99	477,93	4329	4366	4270	4445	6003	7683	7605	7741		5805	1648

5076 – Valores não considerados por estarem fora da gama

*Provete partido, como tal não foi possível ser ensaiado

Quadro V.5 – Resistências mecânicas dos provetes de todas as argamassas, 28, 90 e 180 dias

Argamassa	28 dias					90 dias					180 dias				
	Provete	Ft [N]	Fc [N]	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Provete	Ft [N]	Fc [N]	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Provete	Ft [N]	Fc [N]	Rt [MPa]	Rc [MPa]
NHL_M	GM11	214	2059	0,50	1,29	GM14	449	4353	1,05	2,72	GM17	485	4579	1,14	2,86
	GM12	226	2009	0,53	1,26	GM15	446	3869	1,04	2,42	GM19	471	3415	1,10	2,13
	GM13	205	1660	0,48	1,04	GM16	457	3985	1,07	2,49	GM110	498	4204	1,17	2,63
NHL_H	GH21	396	2532	0,93	1,58	GH24	532	4273	1,25	2,67	GH27	621	3832	1,45	2,40
	GH22	362	2118	0,85	1,32	GH25	505	4005	1,18	2,5	GH28	501	3962	1,17	2,48
	GH23	354	2594	0,83	1,62	GH26	491	3064	1,15	1,91	GH29	502	4223	1,18	2,64
NHL_S	GS31	239	1610	0,56	1,01	GS34	206	2078	0,48	1,3	GS37	240	1605	0,56	1,00
	GS32	207	1603	0,48	1,00	GS35	230	1745	0,54	1,09	GS38	267	2031	0,62	1,27
	GS33	214	1656	0,50	1,04	GS36	240	2050	0,56	1,28	GS39	239	1836	0,56	1,15
NHL_10Mk_M	GM41	391	5118	0,92	3,20	GM44	324	7105	0,76	4,44	GM47	369	7368	0,86	4,60
	GM42	366	5052	0,86	3,16	GM45	418	8716	0,98	5,45	GM48	399	5175	0,93	3,23
	GM43	365	5014	0,86	3,13	GM46	331	6901	0,78	4,31	GM49	359	6752	0,84	4,22
NHL_10Mk_H	GH51	273	5624	0,64	3,51	GH54	555	7845	1,3	4,9	GH57	580	6040	1,36	3,77
	GH52	343	5786	0,80	3,62	GH55	613	4970	1,44	3,11	GH58	579	6123	1,36	3,83
	GH53	341	6589	0,80	4,12	GH56	498	6472	1,17	4,05	GH59	602	5197	1,41	3,25
NHL_10Mk_S	GS61	364	7314	0,85	4,57	GS64	263	7137	0,62	4,46	GS67	230	4650	0,54	2,91
	GS62	413	6806	0,97	4,25	GS65	296	6705	0,69	4,19	GS68	324	8379	0,76	5,24
	GS63	304	5440	0,71	3,40	GS66	346	7355	0,81	4,6	GS69	259	5008	0,61	3,13
NHL_20Mk_M	GM71	478	9951	1,12	6,22	GM74	446	6933	1,04	4,33	GM77	379	5874	0,89	3,67
	GM72	487	10498	1,14	6,56	GM75	533	10707	1,25	6,69	GM78	347	9051	0,81	5,66
	GM73	491	10930	1,15	6,83	GM76	473	10608	1,11	6,63	GM79	403	9574	0,94	5,98
NHL_20Mk_H	GH81	560	12610	1,31	7,88	GH84	686	13140	1,61	8,21	GH87	516	8895	1,21	5,56
	GH82	670	10780	1,57	6,74	GH85	571	11128	1,34	6,95	GH88	597	7656	1,40	4,78
	GH83	543	10699	1,27	6,69	GH86	646	12410	1,51	7,76	GH89	589	7883	1,38	4,93
NHL_20Mk_S	GS91	443	11149	1,04	6,97	GS94	328	9684	0,77	6,05	GS97	482	5155	1,13	3,22
	GS92	493	10861	1,16	6,79	GS95	375	10535	0,88	6,58	GS98	499	6671	1,17	4,17
	GS93	485	11269	1,14	7,04	GS96	389	11072	0,91	6,92	GS99	466	9915	1,09	6,20

Quadro V.6 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente dos provetes de todas as argamassas aos 28 dias

Argamassa	Identificação provete	Massa [g]			P _{ab} [%]	MVA [kg/m ³]
		M1	M2	M3		
NHL_M	GM11	54,6	32,7	63,2	28,2	1789
	GM12	51,9	30,9	60,1	28,1	1778
	GM13	51,1	30,5	59,0	27,8	1795
NHL_H	GH21	56,4	33,5	65,5	28,4	1761
	GH22	37,8	22,5	44,2	29,6	1744
	GH23	51,9	30,9	60,1	28,0	1782
NHL_S	GS31	63,0	37,5	72,6	27,3	1794
	GS32	52,7	31,5	61,2	28,6	1778
	GS33	53,3	31,7	61,7	27,8	1779
NHL_10Mk_M	GM41	60,1	35,4	69,9	28,4	1743
	GM42	54,1	31,5	63,0	28,2	1722
	GM43	65,4	38,4	76,0	28,1	1739
NHL_10Mk_H	GH51	54,3	32,1	63,0	28,1	1758
	GH52	64,4	38,1	75,0	28,6	1744
	GH53	65,8	38,6	75,9	27,0	1763
NHL_10Mk_S	GS61	51,4	30,2	59,8	28,3	1741
	GS62	110,9	65,3	127,7	26,9	1778
	GS63	77,2	45,5	89,4	27,9	1758
NHL_20Mk_M	GM71	54,1	31,5	62,8	27,7	1734
	GM72	53,2	30,7	61,9	27,7	1711
	GM73	52,7	31,1	61,1	27,8	1755
NHL_20Mk_H	GH81	59,6	35,1	69,4	28,7	1734
	GH82	75,6	44,4	87,5	27,6	1753
	GH83	65,4	38,6	75,7	27,7	1762
NHL_20Mk_S	GS91	61,5	35,7	71,0	27,1	1742
	GS92	72,3	42,0	83,7	27,3	1737
	GS93	61,2	36,0	70,4	26,9	1780

Quadro V.7 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente dos provetes de todas as argamassas aos 90 dias

Argamassa	Identificação provete	Massa [g]			P _{ab} [%]	MVA [kg/m ³]
		M1	M2	M3		
NHL_M	GM14	62,8	37,2	71,7	25,8	1821
	GM15	49,7	29,3	56,8	25,9	1809
	GM16	73,1	43,7	83,6	26,2	1832
NHL_H	GH24	54,3	32,7	63,0	28,6	1792
	GH25	84,5	50,6	97,3	27,4	1810
	GH26	66,6	39,6	76,6	27,0	1801
NHL_S	GS34	62,3	37,2	71,8	27,4	1801
	GS35	56,1	33,5	65,1	28,6	1776
	GS36	63,4	37,8	72,5	26,3	1828
NHL_10Mk_M	GM44	79,4	46,9	91,5	27,3	1779
	GM45	64,8	38,5	74,5	26,8	1801
	GM46	59,9	35,5	69,8	28,7	1748
NHL_10Mk_H	GH54	75,8	44,5	87,1	26,7	1778
	GH55	56,4	32,9	65,2	27,1	1749
	GH56	62,6	37,0	72,5	28,0	1762
NHL_10Mk_S	GS64	69,4	41,1	80,3	27,7	1772
	GS65	75,5	44,8	87,1	27,5	1785
	GS66	66,8	39,5	76,9	27,0	1784
NHL_20Mk_M	GM74	71,0	41,8	82,0	27,4	1770
	GM75	68,6	40,0	79,3	27,3	1743
	GM76	71,3	42,1	82,4	27,4	1772
NHL_20Mk_H	GH84	86,2	50,9	99,3	27,1	1780
	GH85	89,0	52,2	102,5	26,9	1766
	GH86	89,0	52,5	102,7	27,3	1770
NHL_20Mk_S	GS94	65,0	38,3	75,4	28,0	1753
	GS95	73,1	43,1	84,4	27,3	1773
	GS96	67,4	39,8	78,2	27,9	1756

Quadro V.8 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente dos provetes de todas as argamassas aos 180 dias

Argamassa	Identificação Provede	Massa [g]			P _{ab} [%]	MVA [kg/m ³]
		M1	M2	M3		
NHL_M	GM17	64,9	39,3	73,3	24,6	1912
	GM19	87,6	53,0	99,1	25,0	1898
	GM110	95,6	58,2	109	25,7	1900
NHL_H	GH27	67,6	41,0	76,4	24,8	1910
	GH28	44,4	27,5	50,8	27,3	1908
	GH29	66,8	40,5	75,9	25,6	1888
NHL_S	GS37	66,7	40,3	75,8	25,8	1876
	GS38	54,9	33,3	62,1	25,1	1905
	GS39	63,0	38,1	71,8	26,1	1870
NHL_10Mk_M	GM47	59,5	35,8	67,6	25,5	1873
	GM48	71,6	43,2	81,9	26,5	1852
	GM49	67,6	40,6	77,4	26,6	1839
NHL_10Mk_H	GH57	52,7	31,8	60,2	26,3	1858
	GH58	67,3	40,6	77,4	27,4	1832
	GH59	72,6	43,7	83,0	26,4	1844
NHL_10Mk_S	GS67	88,2	53,1	101	26,6	1840
	GS68	74,1	44,3	84,1	25,1	1865
	GS69	65,1	39,2	74,6	26,9	1841
NHL_20Mk_M	GM77	83,9	50	95,8	26,0	1834
	GM78	70,6	42,3	80,7	26,2	1840
	GM79	55,2	33,1	63,1	26,5	1840
NHL_20Mk_H	GH87	58,5	34,9	67,1	26,6	1820
	GH88	70,9	42,4	81,2	26,7	1825
	GH89	64,1	38,3	73,2	26,2	1834
NHL_20Mk_S	GS97	55,6	33,4	63,8	26,7	1831
	GS98	67,5	40,3	77,4	26,8	1819
	GS99	62,6	37,6	71,4	26,0	1856

Quadro V.9 – Variações de massa das argamassas no ensaio de resistência aos sulfatos, 28 dias

Ciclo	Argamassas								
	NHL_M	NHL_H	NHL_S	NHL_10Mk_M	NHL_10Mk_H	NHL_10Mk_S	NHL_20Mk_M	NHL_20Mk_H	NHL_20Mk_S
1	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5	0,2
2	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5
3	1,7	2,1	1,5	2,6	2,5	2,8	2,9	3,2	2,8
4	1,8	2,5	1,6	2,9	2,9	3,3	3,1	4,0	3,3
5	2,3	2,8	2,5	3,9	3,7	3,8	3,3	4,3	3,2
6	2,7	3,5	2,5	3,8	3,4	3,8	3,8	4,3	3,4
7	1,6	1,7	1,5	1,5	1,6	1,4	1,6	1,5	1,6
8	1,9	2,1	1,8	-48,9	-28,0	-8,0	2,4	2,5	1,8
9	1,9	2,0	1,8	-52,6	-38,7	-39,8	1,9	1,9	2,0
10	2,3	2,5	2,1	-66,5	-69,8	-76,9	-6,1	-15,4	0,3
11	2,4	2,4	2,0	-67,4	-70,2	-78,6	-69,6	-30,8	-64,6
12	0,7	1,1	1,5	-72,7	-71,6	-100,0	-84,2	-44,0	-69,4
13	0,0	-3,7	1,4	-76,0	-74,7	-	-89,6	-62,6	-84,4
14	-0,4	-46,7	1,4	-100,0	-79,6	-	-90,4	-79,4	-85,0
15	-34,1	-66,0	1,0	-	-90,3	-	-100,0	-100,0	-93,3
16	-38,6	-66,9	-70,8	-	-91,0	-	-	-	-100,0
17	-53,0	-67,0	-88,5	-	-91,6	-	-	-	-
18	-55,9	-72,6	-100,0	-	-100,0	-	-	-	-
19	-63,4	-78,1	-	-	-	-	-	-	-
20	-67,1	-78,3	-	-	-	-	-	-	-

2,4 – Valores do ciclo de comparação

Quadro V.10 – Variações de massa das argamassas no ensaio de resistência aos sulfatos, 28 dias

Ciclo	Argamassas								
	NHL_M	NHL_H	NHL_S	NHL_10Mk_M	NHL_10Mk_H	NHL_10Mk_S	NHL_20Mk_M	NHL_20Mk_H	NHL_20Mk_S
1	0,7	0,7	0,5	1,0	1,2	0,9	1,3	1,9	1,6
2	0,9	1,2	1,3	1,3	2,1	1,4	1,6	2,5	2,2
3	1,2	2,2	1,6	1,7	2,1	1,7	1,8	2,4	2,1
4	1,6	2,8	2,5	2,0	2,4	2,4	1,6	2,8	2,5
5	1,1	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,1	1,0	1,5
6	1,3	1,6	1,5	1,3	1,6	1,5	1,4	-15,8	1,8
7	1,5	3,5	2,9	1,8	-32,6	2,1	-17,1	-40,5	2,5
8	1,1	2,0	1,8	1,3	-35,3	1,7	-16,9	-45,5	2,1
9	0,4	1,3	2	0,8	-62,3	1,7	-17,1	-45,9	3,8
10	-0,8	0,3	2,3	-72,7	-74,0	0,2	-19,0	-48,3	1,6
<u>11</u>	<u>-0,9</u>	<u>1,0</u>	<u>2,7</u>	<u>-85,1</u>	<u>-100</u>	<u>-22,6</u>	<u>-59,7</u>	<u>-67,7</u>	<u>-32,2</u>
12	-1,0	0,5	2,5	-86,6	-	-22,8	-86,9	-71,2	-36,0
13	-1,2	0,5	2,5	-100	-	-24,1	-87,2	-82,4	-53,1
14	-1,4	0,0	2,5	-	-	-48,6	-87,2	-92,8	-80,1
15	-1,4	0,7	1,8	-	-	-54,8	-87,2	-92,9	-100,0
16	-1,4	0,2	1,7	-	-	-55,0	-100,0	-100,0	-
17	-1,6	0,3	1,2	-	-	-64,7	-	-	-
18	-1,5	0,4	1,2	-	-	-65,2	-	-	-
19	-1,3	-9,8	1,3	-	-	-65,2	-	-	-
20	-3,3	-12,6	-0,9	-	-	-66,1	-	-	-

2,4 – Valores do ciclo de comparação

Anexo VI – Trabalhos expostos

- CRSEL 2012 - 2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono, [GRILLO, J. & FARIA, P., 2012a]



2.ª Conferência
Construção e Reabilitação Sustentável
de Edifícios no Espaço Lusófono

INFLUÊNCIA DA CURA E DA PERCENTAGEM DE METACAULINO EM ARGAMASSAS DE CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL3.5 A IDADE JOVEM

DEC Departamento de Engenharia Civil

REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS - REBOCOS DE ALVENARIAS ANTIGAS

Muitos edifícios antigos apresentam deficiências a nível dos rebocos exteriores. Face à grande crise no setor da construção, a reabilitação de edifícios surge como uma oportunidade. Como tal, a investigação de novas soluções de intervenção em edifícios antigos ganha importante relevo. Este trabalho enquadra-se nos trabalhos desenvolvidos no projeto **METACAL**, que estuda as argamassas com base em cal e os benefícios da introdução do metacaulino nestas argamassas. A cal hidráulica natural 3.5 é uma cal com propriedades hidráulicas mas com elevado teor em Ca(OH)₂, e como tal potencialmente compatível para aplicação na reabilitação de edifícios; é também um ligante mais sustentável que outros ligantes hidráulicos por ser produzido a cerca de metade da temperatura necessária para a produção do cimento, com vantagens energéticas evidentes.

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DO TRABALHO

COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS E CONDIÇÕES DE CURA

Para produzir os provetes foram preparadas três diferentes argamassas ao traço volumétrico de 1:3 sendo estas compostas por:

Cal Hidráulica Natural 3.5

Metacaulino (substituindo a cal na percentagem mássica de 10% e 20%)
Mistura de Areias siliciosas lavadas AREIPOR na proporção volumétrica de 1 APAS 12 + 1,5 APAS 20 + 1,5 APAS 30

Após preparados e desmoldados os provetes estes foram colocados em três diferentes condições de cura até serem ensaiados, aos 28 dias de idade:

- Cura Marítima (M)** - Exposição natural em ambiente marítimo na estação experimental do LNEC no Cabo Raso, Cascais
- Cura Húmida (H)** - Em ambiente controlado de HR = 90±5% e T = 20±5°C
- Cura Standard (S)** - Em ambiente controlado de HR = 65±5% e T = 20±5°C

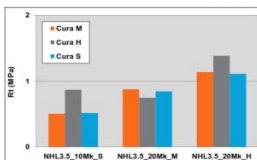


QUADRO RESUMO DA COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS

Curas	Metacaulino (% Mk)	Designação das argamassas	Traço ponderal	Relação Água/Ligante	Espalhamento médio (mm)
			Lime:Mk:Ar		
Cura M	0	NHL3.5_0Mk_M	1:0:5	1,05	153
Cura H		NHL3.5_0Mk_H			
Cura S		NHL3.5_0Mk_S			
Cura M	10	NHL3.5_10Mk_M	1:0,15	1,05	149
Cura H		NHL3.5_10Mk_H			
Cura S		NHL3.5_10Mk_S			
Cura M	20	NHL3.5_20Mk_M	1:0,2:5	1,05	143
Cura H		NHL3.5_20Mk_H			
Cura S		NHL3.5_20Mk_S			

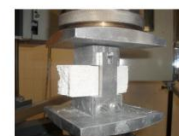
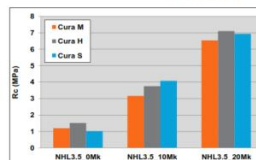
RESULTADOS EXPERIMENTAIS

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (Rt)



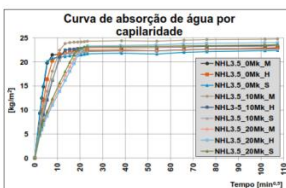
Ensaio de tração por flexão

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (Rc)

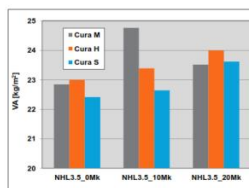
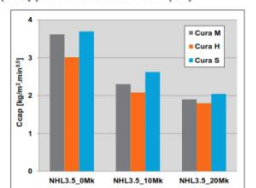


Ensaio de Compressão

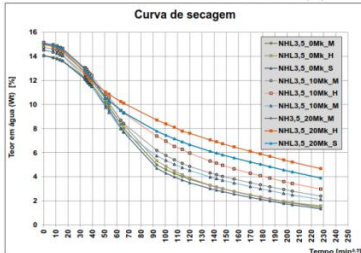
COEFICIENTE DE CAPILARIDADE (Ccap) E VALOR ASSINTÓTICO (VA)



Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade



ÍNDICE DE SECAGEM (IS)



Argamassa	IS
NHL3.5_0Mk_M	0,26
NHL3.5_0Mk_H	0,26
NHL3.5_0Mk_S	0,24
NHL3.5_10Mk_M	0,33
NHL3.5_10Mk_H	0,38
NHL3.5_10Mk_S	0,30
NHL3.5_20Mk_M	0,43
NHL3.5_20Mk_H	0,49
NHL3.5_20Mk_S	0,41



Ensaio de Secagem

PRINCIPAIS CONCLUSÕES

- A presença do metacaulino **aumenta a resistência à compressão e resistência à tração** das argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5.
- As argamassas sujeitas à Cura H apresentam uma **maior resistência tanto à compressão como à tração** , talvez por a manutenção da humidade no seu interior **aumentar a reação hidráulica** .
- As argamassas com uma **maior** quantidade de metacaulino apresentam uma **menor** velocidade de **absorção capilar de água** ; no entanto estas argamassas podem absorver uma **maior** quantidade de água total.
- Na **secagem** as argamassas sem metacaulino, com **menor** quantidade total de água absorvida, têm uma **secagem mais rápida** face às argamassas com metacaulino.
- O estudo prossegue com a avaliação da evolução destas características com a idade das argamassas; no entanto, as características obtidas pronunciam a adequabilidade destas argamassas para aplicação na reabilitação de edifícios.

- CIRea - Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria [GRILLO, J. & FARIA, P., 2012b]

INFLUÊNCIA DA CURA E DA PERCENTAGEM DE METACAULINO EM IDADES JOVENS DE ARGAMASSAS DE CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL3.5

João Grilo
FCT UNL
jonegrilo@hotmail.com

NHL3.5

Paulina Faria
FCT UNL
paulina.faria@fct.unl.pt

ARGAMASSAS PARA A REABILITAÇÃO DE ALVENARIAS ANTIGAS

Muitos edifícios antigos apresentam deficiências ao nível dos rebocos exteriores. Face à grande crise no setor da construção, a reabilitação de edifícios surge como uma oportunidade. Como tal, a investigação de melhores soluções para intervenção em edifícios antigos ganha importante relevo. Este trabalho enquadra-se nos trabalhos desenvolvidos no projeto METACAL, que estuda argamassas com base em cal e a influência da introdução do metacaulino – uma pozolana artificial - nestas argamassas. A cal hidráulica natural NHL3.5 segundo a NP EN 459-1: 2011 é uma nova cal com propriedades hidráulicas mas com elevado teor em Ca(OH)₂ e como tal potencialmente compatível para aplicação na reabilitação de alvenarias antigas. É produzida a cerca de metade da temperatura necessária para a produção do cimento, com vantagens energéticas evidentes. Interessa conhecer e otimizar as propriedades de argamassas realizadas com base nesta cal.

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL




Argamassas e Condições de Cura

Para produzir os provetes foram preparadas três diferentes argamassas ao traço volumétrico de 1:3 sendo estas compostas por:

- ✓ Cal Hidráulica Natural NHL3.5
- ✓ Metacaulino, Mk (substituindo a cal nas percentagens mássica de 10% e 20%)
- ✓ Mistura bem graduada de areias siliciosas lavadas

Após preparados e desmoldados os provetes estes foram colocados em três diferentes condições de cura até serem ensaiados, aos 28 e 90 dias de idade:

- ✓ Cura Marítima (M) - Exposição natural em ambiente marítimo na estação experimental do LNEC no Cabo Raso, Cascais
- ✓ Cura Húmida (H) - Em ambiente controlado de HR = 90±5% e T = 20±3°C
- ✓ Cura Standard (S) - Em ambiente controlado de HR = 65± 5 % e T = 20±5°C

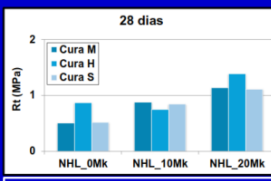
Composição das Argamassas e Consistência

Cura	% Mk	Designação das argamassas	Traço ponderal NHL:Mk:Ar	Relação Água/(NHL+Mk)	Consistência média (mm)
M	0	NHL_0Mk_M	1:0:5	1,1	153
H		NHL_0Mk_H			
S		NHL_0Mk_S			
M	10	NHL_10Mk_M	1:0,1:5,5	1,1	149
H		NHL_10Mk_H			
S		NHL_10Mk_S			
M	20	NHL_20Mk_M	1:0,25:6	1,1	143
H		NHL_20Mk_H			
S		NHL_20Mk_S			

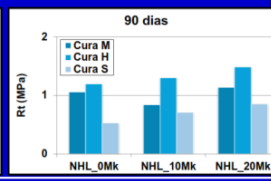
ANÁLISE DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

Resistência à Tração (Rt)

28 dias



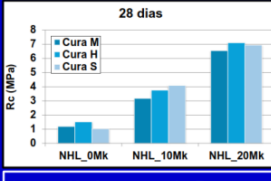
90 dias



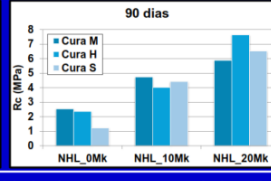
- ✓ Cura M: Aumento de Rt com a idade de argamassas só de NHL (evolução da carbonatação); estabilização de Rt nas argamassas com Mk (talvez deficiência de humidade ou de Ca(OH)₂ para a reação)
- ✓ Cura H: Aumento da Rt com a idade e % Mk (continuação da reação hidráulica e/ou de carbonatação)
- ✓ Cura S: Estabilização da Rt com a idade (possível défice de humidade para as reações)

Resistência à Compressão (Rc)

28 dias



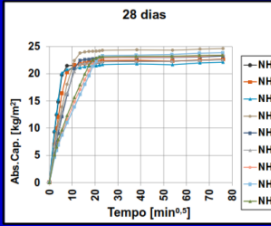
90 dias



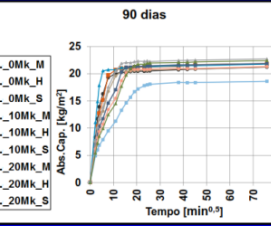
- ✓ Cura M: Aumento da Rc com a idade das argamassas só de cal e com 10% de Mk
- ✓ Cura H: Ligeiro aumento da Rc com a idade e com a % de Mk (continuação da reação hidráulica e/ou de carbonatação)
- ✓ Cura S: Aumento de Rc com a % de Mk; estabilização da Rc com a idade (possível défice de humidade para as reações)

Absorção de Água por Capilaridade

28 dias



90 dias



- ✓ Verificou-se uma diminuição do valor máximo de água absorvida pelas argamassas com a idade
- ✓ De um modo geral a velocidade de absorção de água de muitas argamassas mantém-se da mesma ordem de grandeza mas diminui relativamente à argamassa com 20% de Mk e cura H

Continuação do estudo

- ✓ A caracterização das argamassas com base em NHL3.5 continua a ser desenvolvida, procurando principalmente avaliar as potencialidades que este tipo de ligante pode apresentar em argamassas para aplicação em reabilitação
- ✓ Para além da análise da evolução da microestrutura interna, está também a ser avaliada a facilidade de secagem e a resistência à ação de sais solúveis



Agradece-se o financiamento ao projeto METACAL (PTDC/ECM/100431/2008)

