



Rui Moreira Pires Antunes

Licenciado em Ciências da Engenharia

Argamassas de cal hidráulica natural NHL5
Influência do teor em metacaulino, da cura e da idade

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

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

Júri:

Presidente: Doutor Miguel José das Neves Pires Amado
Arguente: Doutor António Santos Silva
Vogal: Doutora Maria Paulina Santos Forte Faria Rodrigues



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2013

“Copyright” Rui Moreira Pires Antunes, Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa

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 objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado não teria sido possível sem o apoio de todos que, directa ou indirectamente, tornaram possível a sua execução. Manifesto o meu agradecimento:

À Professora Doutora Paulina Faria Rodrigues, orientadora da presente dissertação, por toda a disponibilidade e simpatia demonstrada, pelo apoio prestado, pela constante partilha de conhecimentos e pelo rigor exigido em todas as fases do trabalho.

Ao Eng. Vítor Silva, bolseiro da FCT-UNL, pela transmissão de conhecimentos, pela total disponibilidade, amizade e empenho demonstrados, bem como pela ajuda prestada quer na realização de toda a campanha experimental, quer ao longo de toda a dissertação.

Ao Doutor André Gameiro, bolseiro do projecto FCTMETACAL, por todo o apoio prestado.

Aos colegas André Bandeira, Duarte Mergulhão, João Grilo, e Ricardo Vieira, companheiros de laboratório ao longo de todo o desenvolvimento experimental, pela ajuda, companhia e disponibilidade demonstrada, bem como pela partilha de ideias, documentos e conhecimentos ao longo de todo o trabalho.

Aos meus pais, António Pires Antunes e Maria Luísa Moreira Antunes, e irmão, Gonçalo Moreira Pires Antunes, pelos sacrifícios realizados de modo a proporcionarem a realização do meu percurso académico, toda a compreensão, motivação e apoio incondicional transmitidos durante este trabalho, bem como durante todo o percurso académico.

A toda a minha família, amigos e colegas de faculdade, por todo o apoio, amizade e compreensão ao longo deste trabalho e da minha vida académica, em especial à minha prima Carla Machado e ao meu primo Pedro Antunes pela ajuda na revisão dos textos e ao colega Rodrigo Massena pela ajuda na organização e estruturação da dissertação.

Resumo

A utilização de argamassas de substituição assume actualmente uma importância significativa devido à crescente necessidade de preservação e reabilitação do património edificado nacional, cuja degradação é acentuada. Neste tipo de intervenção em edifícios antigos é necessário utilizar argamassas que sejam compatíveis com o suporte existente e acrescentem durabilidade ao conjunto, preservando tanto a identidade cultural como o valor histórico dos edifícios. Assim, a aplicação de argamassas de cal hidráulica constitui uma solução de utilização simples e este tipo de argamassas apresenta uma boa compatibilidade com as características dos suportes antigos. A cal hidráulica, relativamente a outros ligantes, exibe uma maior consciência ambiental pelo facto de a sua produção ter um efeito menos pernicioso sobre o meio ambiente. Por outro lado, a substituição parcial de cal hidráulica por pozolanas, nomeadamente o metacaulino, pode originar argamassas com melhores características físicas, mecânicas e químicas.

Com o presente trabalho pretende-se dar seguimento aos estudos realizados no âmbito dos projectos de caracterização de argamassas de cal com adição de pozolanas FCT METACAL e LIMECONTECH. Esta dissertação apresenta um estudo sobre a caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL5, com substituição crescente de igual massa de cal por metacaulino, quando sujeitas a dois tipos de cura distintos – uma em condições de humidade relativa $65\pm 5\%$ numa sala climatizada e outra em ambiente marítimo, na estação de exposição natural do LNEC no cabo Raso – Guincho.

Para a caracterização das argamassas produzidas realizaram-se ensaios mecânicos e físicos a diferentes idades de cura (28, 90 e 180 dias), nomeadamente, determinação do módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão e compressão, determinação da absorção de água por capilaridade, da secagem, da porosidade aberta, da condutibilidade térmica e da resistência aos sulfatos.

Os resultados dos ensaios estão directamente relacionados com as condições de cura às quais as argamassas foram sujeitas e permitem verificar qual a percentagem de metacaulino a utilizar, de modo a obtermos uma argamassa de substituição mais sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Argamassa substituição, reabilitação de edifícios, cal hidráulica natural, pozolana, metacaulino, ensaios, condições de cura.

Abstract

The use of substitution renders currently holds a significant importance due to the increasing need to preserve and rehabilitate the national built heritage, whose degradation is accentuated. When restoring or rehabilitating old buildings is necessary to use mortars that are compatible with the existing background and that add durability to the structure, preserving the aesthetic, cultural identity and historical value of those constructions. Thus, the application of natural hydraulic lime mortar consists on a solution that is simple to use. Moreover, this type of mortar exhibits good compatibility with the original building materials, as it closely resembles the original ones used in the construction. The hydraulic lime, relative to other binders, exhibits further environmental awareness mainly due to the fact that their production has a less damaging effect on the environment. Additionally, the partial replacement of hydraulic lime for pozzolanic additives, particularly metakaolin, improves physical, mechanical and chemical characteristics of the mortar.

The present work intends to follow up the studies conducted within the projects FCT METACAL and LIMECONTECH for the characterization of binders consisting in lime mortars with pozzolanic additives. Thereby, this dissertation presents a study on the characterization of NHL5 natural hydraulic lime mortars with increasing substitution of equal mass of lime by metakaolin, when subjected to two different types of curing, concerning their behaviour under different environmental exposure conditions, one in room condition ($65 \pm 5\%$ relative humidity) and another in LNEC experimental station of natural exposure at Cabo Raso - Guincho (maritime environment).

Tests were carried out for characterization of the produced mortars at the curing age of 28, 90 and 180 days. Those tests included the mechanical evaluation, throughout the determination of the dynamic modulus of elasticity, tensile strength and compression bending and physical tests to assess capillary water absorption, drying shrinkage, open porosity, thermal conductivity and resistance to sulphates.

The results obtained are directly related to the curing conditions which the mortars were subjected. These results establish a contribution in the study subject as they allow checking the stated percentage of metakaolin to be used in order to obtain a more sustainable substitution mortar.

KEYWORDS: Substitution mortars, building rehabilitation, natural hydraulic lime, pozzolanic additives, metakaolin, curing conditions.

Índice de Texto

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objectivos	3
1.3. Estrutura da Dissertação	3
2. Estado do Conhecimento	5
2.1. Introdução	5
2.2. Materiais constituintes das argamassas	6
2.2.1. Ligantes.....	6
2.2.1.1. Cal hidráulica.....	7
2.2.2. Pozolanas.....	8
2.2.2.1. Metacaulino	9
2.2.3. Agregados.....	10
2.3. Argamassas – Exigências Funcionais das Argamassas	11
2.4. Argamassas de cal hidráulica e metacaulino	14
3. Procedimento Experimental.....	16
3.1. Introdução.....	16
3.2. Matérias-primas utilizadas	16
3.2.1. Ligante	16
3.2.2. Pozolana	17
3.2.3. Agregado.....	17
3.3. Argamassas produzidas e condições de cura	17
3.4. Plano de trabalhos experimentais.....	18
3.5. Caracterização das matérias-primas	19
3.5.1. Análise granulométrica.....	19
3.5.2. Determinação da baridade	21
3.6. Formulações das argamassas estudadas	22
3.7. Preparação das argamassas e caracterização no estado fresco	22
3.7.1. Amassaduras	22
3.7.2. Determinação da consistência por espalhamento.....	23
3.8. Execução dos provetes e condições de cura.....	25
3.8.1. Moldagem, desmoldagem e cura inicial dos provetes.....	25
3.8.1.1. Cura Standard	26
3.8.1.2. Cura Marítima.....	26
3.9. Caracterização das argamassas no estado endurecido	27
3.9.1. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico	27
3.9.2. Determinação da resistência à tracção por flexão.....	29
3.9.3. Determinação da resistência à compressão	30
3.9.4. Determinação da absorção de água por capilaridade	31
3.9.5. Determinação da secagem	33
3.9.6. Determinação da porosidade aberta e da massa volúmica aparente.....	35
3.9.7. Determinação da condutibilidade térmica	37
3.9.8. Determinação da resistência aos sulfatos	38
4. Apresentação e Análise de Resultados.....	40
4.1. Introdução.....	40

4.2.	Resultados referentes à caracterização das argamassas no estado fresco	40
4.2.1.	Consistência por espalhamento	40
4.3.	Resultados referentes à caracterização das argamassas no estado endurecido	41
4.3.1.	Módulo de elasticidade dinâmico	41
4.3.2.	Resistência à tracção por flexão	45
4.3.3.	Resistência à compressão	48
4.3.4.	Absorção de água por capilaridade	51
4.3.5.	Secagem	58
4.3.6.	Porosidade aberta e massa volúmica aparente	63
4.3.7.	Condutibilidade térmica	66
4.3.8.	Resistência aos sulfatos	68
5.	Discussão de Resultados	72
5.1.	Interacção entre características das argamassas	72
5.2.	Aplicações das argamassas estudadas	82
5.3.	Comparação com outros estudos	86
6.	Conclusões e Sugestões Para Trabalhos Futuros	91
6.1.	Conclusões	91
6.2.	Sugestões para trabalhos futuros	94
	Referências Bibliográficas	95
	ANEXOS	101
	Anexo 1 – Ficha técnica da cal hidráulica NHL5	102
	Anexo 2 – Ficha técnica do metacaulino	105
	Anexo 3 – Resultados individuais do Espalhamento	106
	Anexo 4 – Resultados individuais do módulo de elasticidade dinâmico	107
	Anexo 5 – Resultados individuais da resistência à tracção e à compressão	110
	Anexo 6 – Resultados individuais da porosidade aberta e massa volúmica aparente	113
	Anexo 7 – Resultados individuais da resistência aos sulfatos	116

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Estrutura da dissertação por capítulos.....	3
Figura 2.1 - Proporção das obras de reabilitação do edificado relativamente às construções novas de edifícios de habitação (INE) [PIRES & BRAGANÇA, 2011].....	5
Figura 3.1 - Curva granulométrica das areias e da mistura de areias	20
Figura 3.2 - Processo de realização das argamassas.....	23
Figura 3.3 - Determinação da consistência por espalhamento	24
Figura 3.4 - Preenchimento dos moldes com argamassa e rasamento dos provetes após compactação mecânica.....	25
Figura 3.5 - Cura inicial dentro de saco de polietileno e desmoldagem dos provetes.....	26
Figura 3.6 - Provetes na sala de cura standard.....	26
Figura 3.7 - Provetes na estação de exposição natural do LNEC.....	27
Figura 3.8 - Equipamento “ZEUS Resonance Meter”.....	28
Figura 3.9 - Colocação do provete para ensaio de flexão e formação da superfície de rotura	29
Figura 3.10 - Colocação do provete para ensaio de compressão e formação da superfície de rotura.....	31
Figura 3.11 - Aspecto dos provetes com gaze e película aderente.....	32
Figura 3.12 - Ensaio de Absorção de água por capilaridade: colocação dos provetes dentro do recipiente e pesagem dos provetes.....	33
Figura 3.13 - Ensaio de secagem.....	34
Figura 3.14 - Ensaio de porosidade aberta e massa volúmica aparente.....	36
Figura 3.15 – Equipamento para medição da condutibilidade térmica	38
Figura 3.16 - Ensaio de resistência aos sulfatos: colocação dos provetes dentro do recipiente e colocação na estufa.	39
Figura 4.1 - Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas aos 28, 90 e 180 dias.....	42
Figura 4.2 - Módulo de elasticidade dinâmico em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 28 dias.....	43
Figura 4.3 - Módulo de elasticidade dinâmico em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 90 dias.....	44
Figura 4.4 - Módulo de elasticidade dinâmico em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 90 dias.....	44
Figura 4.5 - Resistência à tracção por flexão das argamassas aos 28, 90 e 180	46
Figura 4.6 - Resistência à tracção por flexão em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 28 dias.....	47
Figura 4.7 - Resistência à tracção por flexão em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 90 dias.....	47
Figura 4.8 - Resistência à tracção por flexão em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 180 dias.....	48
Figura 4.9 - Resistência à compressão das argamassas aos 28, 90 e 180	49
Figura 4.10- Resistência à compressão em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 28 dias.....	50
Figura 4.11 - Resistência à compressão em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 90 dias.....	50
Figura 4.12 - Resistência à compressão em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 180 dias.....	51
Figura 4.13 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28, 90 e 180 dias.....	52
Figura 4.14 - Valor assintótico das argamassas aos 28, 90 e 180 dias	53
Figura 4.15 - Coeficiente de capilaridade das argamassas aos 28, 90 e 180 dias.....	54
Figura 4.16 -Valor assintótico em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 28 dias.....	55

Figura 4.17 - Valor assintótico em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 90 dias.	55
Figura 4.18 - Valor assintótico em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 180 dias.	56
Figura 4.19 - Fase inicial das curvas absorção de água por capilaridade aos 28, 90 e 180 dias....	57
Figura 4.20 - Coeficiente de capilaridade em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino	58
Figura 4.21 - Curvas de secagem das argamassas aos a) 28, b) 90 e c) 180 dias.....	59
Figura 4.22 - Taxa de secagem das argamassas aos 28, 90 e 180 dia	60
Figura 4.23- Índice de secagem das argamassas aos 28, 90 e 180 dias.....	61
Figura 4.24 - índice de Secagem e Taxa de secagem para cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 28, 90 e 180 dias	62
Figura 4.25 - Degradação da argamassa NHL5_0Mk_S durante o ensaio de porosidade aberta aos 90 dias.....	63
Figura 4.26 - Porosidade aberta das argamassas aos 28, 90 e 180 dias	64
Figura 4.27 - Massa volúmica aparente das argamassas aos 28, 90 e 180 dias	64
Figura 4.28 - Porosidade aberta e massa volúmica aparente para cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 28, 90 e 180 dias	66
Figura 4.29 - Condutibilidade térmica das argamassas aos 28, 90 e 180 dias	67
Figura 4.30 - Resistência aos sulfatos aos 28 dias	68
Figura 4.31 - Resistência aos sulfatos aos 90 dias	69
Figura 4.32 - Resistência aos sulfatos aos 90 dias	70
Figura 4.33 - Evolução com a idade da resistência aos sulfatos.....	71
Figura 5.1 - Módulo de elasticidade dinâmico/resistência à tracção e à compressão aos 28, 90 e 180 dias.....	73
Figura 5.2 - Quociente entre as resistências à tracção e à compressão com a idade	77
Figura 5.3 - Porosidade aberta/ resistência à compressão	78
Figura 5.4 - Porosidade aberta/módulo de elasticidade dinâmico	78
Figura 5.5 - Porosidade aberta/ valor assintótico/velocidade de absorção inicial aos 28, 90 e 180 dias.....	79
Figura 5.6 – Valor assintótico/índice de secagem	81
Figura 5.7 – Taxa de secagem/índice de secagem.....	82
Figura 5.8 - Parâmetros de classificação de argamassas para rebocos e refechamento de juntas, segundo [VEIGA, 2010].....	84
Figura 5.9 - Parâmetros de classificação de argamassas para rebocos, segundo a EN 998-1 [CEN, 2010].....	86
Figura 5.10 - Comparação realizada aos 28 dias entre as características mecânicas das argamassas ensaiadas por Bandeira, com as argamassas ensaiadas no presente estudo.	87
Figura 5.11 - Comparação realizada aos 90 dias entre a Pab e o CC das argamassas ensaiadas por Bandeira, com as argamassas ensaiadas no presente estudo.....	88
Figura 5.12 - Comparação realizada aos 28 dias entre as características mecânicas das argamassas ensaiadas por Grilo, com as argamassas ensaiadas no presente estudo.	89
Figura 5.13 - Comparação realizada aos 28 dias entre a Pab, o CC e a TS das argamassas ensaiadas por Grilo, com as argamassas ensaiadas no presente estudo.	90

Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Requisitos para as características das argamassas de revestimento para edifícios antigos [VEIGA, 2010].....	12
Quadro 3.1 - Identificação das argamassas.....	18
Quadro 3.2 - Ensaios realizados na caracterização no estado endurecido.....	19
Quadro 3.3 - Baridade dos constituintes das argamassas.....	21
Quadro 3.4 - Dosagens por amassadura.....	22
Quadro 4.1 - Traço volumétrico, traços ponderais, relações água/ligante, espalhamento e respectivo desvio-padrão.....	40
Quadro 4.2 - Valores médios e desvios padrão do módulo de elasticidade dinâmico.....	42
Quadro 4.3 - Valores médios e desvios padrão da resistência à tração por flexão.....	45
Quadro 4.4 - Valores médios e desvios padrão da resistência à tração por flexão.....	49
Quadro 4.5 - Valores médios e desvios padrão do valor assintótico e do coeficiente de capilaridade.....	53
Quadro 4.6 - Valores médios e desvios padrão da taxa de secagem e do índice de secagem.....	60
Quadro 4.7 - Valores médios e desvios padrão da porosidade aberta e da massa volúmica aparente.....	63
Quadro 4.8 - Valores médios e desvios padrão da condutibilidade térmica.....	67
Quadro 5.1 – Quadro global de resultados.....	74
Quadro 5.2 - Traço volumétrico, teor em Mk e respectiva condição de cura das argamassas estudadas por Bandeira [Bandeira, 2012].....	86
Quadro 5.3 - Traço volumétrico, teor em Mk e respectiva condição de cura das argamassas estudadas por Bandeira [Bandeira, 2012].....	88

Lista de Abreviaturas

APAS 12 – Areia de granulometria grossa.

APAS 20 – Areia de granulometria intermédia.

APAS 30 – Areia de granulometria fina.

CEN – Comité Européen de Normalisation

DEC – Departamento de Engenharia Civil

EN – European Norm

FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

IPQ – Instituto Português da Qualidade

ISO – International Organization of Standardization

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Mk – Metacaulino Argical M 1200 S

NHL5 – Cal hidráulica natural Secil Martingança NHL5, produzida em Junho de 2011

NP – Norma Portuguesa

Ensaios e determinações

CC – Coeficiente de absorção de água por Capilaridade

CS – Coeficiente de Secagem

DP – Desvio Padrão

Ed – Módulo de elasticidade dinâmico

Esp – Consistência por espalhamento

IS – Índice de Secagem

MVA – Massa Volúmica aparente

Pab – Porosidade aberta

Rc – Resistência à compressão

Rt – Resistência à tracção (por flexão)

TS – Taxa de Secagem

VA – Valor Assintótico

Wt – Teor de água

λ – Condutibilidade térmica

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Desde a antiguidade que as argamassas à base de cal, principalmente de cal aérea, foram utilizadas na construção, encontrando-se actualmente uma grande variedade de argamassas em edifícios antigos [BOTAS, 2009].

O surgimento do cimento Portland levou ao seu uso repentino e excessivo, proporcionando o abandono das argamassas tradicionais à base de cal. [BOTAS, 2009] As argamassas que continham na sua composição o novo ligante caracterizavam-se por possuir resistências mecânicas mais elevadas e o seu baixo tempo de presa (rápido endurecimento) permitia a realização dos trabalhos em prazos mais curtos. Contudo as investigações mais recentes mostram que as argamassas à base de cimento Portland não constituem a solução mais adequada para as intervenções de reabilitação, devido aos inconvenientes que lhe estão normalmente associadas, nomeadamente o elevado módulo de elasticidade (elevada rigidez) que se traduz na incapacidade de acomodar deformações dos suportes, na baixa permeabilidade ao vapor de água e porque contêm na sua composição sais solúveis que são transportados para o interior das paredes que lá cristalizam, contribuindo para a sua degradação [TORGAL *et al.*, 2011; VEIGA, 2003b; COELHO *et al.*, 2012].

Com a necessidade de reabilitação do património edificado, as argamassas de substituição/reabilitação têm vindo a assumir um papel importante nessas intervenções. A escolha da argamassa de substituição deve ser cuidada de forma a garantir durabilidade ao conjunto e compatibilidade com o suporte existente, desta forma não contribuindo para a sua degradação ao mesmo tempo que assegura a preservação dos valores históricos e culturais dos edifícios antigos [RODRIGUES, 2010; PENAS, 2008]. Dada a impossibilidade de se conseguir reproduzir actualmente os materiais e técnicas de aplicação utilizadas no passado, é necessário procurar incrementar o conhecimento científico neste domínio com o objectivo de obter argamassas com o mesmo tipo de comportamento [AGOSTINHO, 2008].

As argamassas de cal hidráulica e cal aérea têm sido aplicadas na reabilitação de edifícios, por constituírem soluções fáceis de usar e dada a sua composição com base em cal, apresentem uma compatibilidade viável com as alvenarias antigas [MAGALHÃES & VEIGA, 2005].

A cal aérea apesar de ser o ligante histórico nas formulações clássicas das argamassas utilizadas, dado que apresenta melhor compatibilidade com edifícios antigos, tem a inconveniência de apresentar uma presa exclusivamente aérea, impossibilitando o seu uso em determinadas obras de reabilitação [SEQUEIRA *et al.*, 2012].

As argamassas de cal hidráulica combinam a presa aérea e a hidráulica, desenvolvendo características adaptadas a vários tipos de suportes [SEQUEIRA *et al.*, 2007; SEQUEIRA *et al.*, 2012]. Proporciona também uma boa trabalhabilidade, um bom acabamento e uma maior rentabilidade de mão-de-obra, melhorando consideravelmente a qualidade da construção [MIRANDA, 2009]. A cal hidráulica natural, comparativamente com outros ligantes hidráulicos, constitui um ligante mais sustentável e potencialmente mais compatível com as características dos suportes antigos onde venha a ser aplicado [FARIA *et al.*, 2012].

A par do interesse pelas argamassas à base de cal tem vindo também a ressurgir o interesse pelo uso das pozolanas a fim de se obter argamassas de conservação com uma maior durabilidade e com características físicas, mecânicas e químicas desejáveis [TORRALBA *et al.*, 2011; FARIA, 2009; FELGUEIRAS, 2011]. Desta forma, a substituição parcial do ligante de argamassas por pozolanas pode resultar em argamassas mais sustentáveis [FARIA *et al.*, 2012].

Tendo em conta os problemas ambientais existentes actualmente, o metacaulino surge como uma boa solução, visto que a sua produção reduz consideravelmente a libertação de CO₂ para a atmosfera quando comparado com a produção de ligantes [COUTINHO, 2006; FELGUEIRAS, 2011]. O metacaulino é uma pozolana artificial obtida por calcinação de argila caulinítica a uma temperatura na ordem dos 650 a 850° C [COUTINHO, 2006]. Uma vez que em Portugal, especialmente no norte e centro do país, dispomos da matéria-prima do metacaulino (caulino) em grandes quantidades, é importante otimizar este recurso [GAMEIRO *et al.*, 2012; VELOSA *et al.*, 2007].

Existem vários trabalhos desenvolvidos sobre a caracterização de argamassas de cal aérea ou de cimento com pozolanas. Contudo, no que respeita a utilização de pozolanas em argamassas de cal hidráulica natural são inexistentes. Partindo deste pressuposto, é objectivo deste estudo alargar o conhecimento em relação às características da cal hidráulica natural de fabrico recente, da influência das condições de cura neste tipo de cal e dos eventuais benefícios e desvantagens que a adição de pozolanas pudesse ter neste tipo de argamassas [FARIA *et al.*, 2012]. A cal hidráulica natural NHL5 usada no presente estudo foi utilizada numa fase em que o produtor ainda estava a desenvolver o produto.

1.2. Objectivos

Pretende-se com esta dissertação caracterizar argamassas de cal hidráulica natural NHL5 ao traço volumétrico 1:3 (ligante e metacaulino: agregado), onde 5, 10 e 20% de massa da cal é substituída por igual massa de metacaulino.

Pretende-se avaliar a importância das condições de cura e a evolução com a idade nas características das argamassas estudadas, tendo em vista a sua aplicação essencialmente na reabilitação de edifícios. De igual forma pretende-se determinar qual a percentagem adequada de metacaulino a usar em determinadas situações para garantir melhores características físicas, mecânicas e químicas nas argamassas de cal hidráulica.

1.3. Estrutura da Dissertação

O texto da presente dissertação está organizado em quatro partes: **Introdução**, **Estado do Conhecimento**, **Trabalho Experimental** e **Conclusões**. A figura 1.1 ilustra esta estruturação.

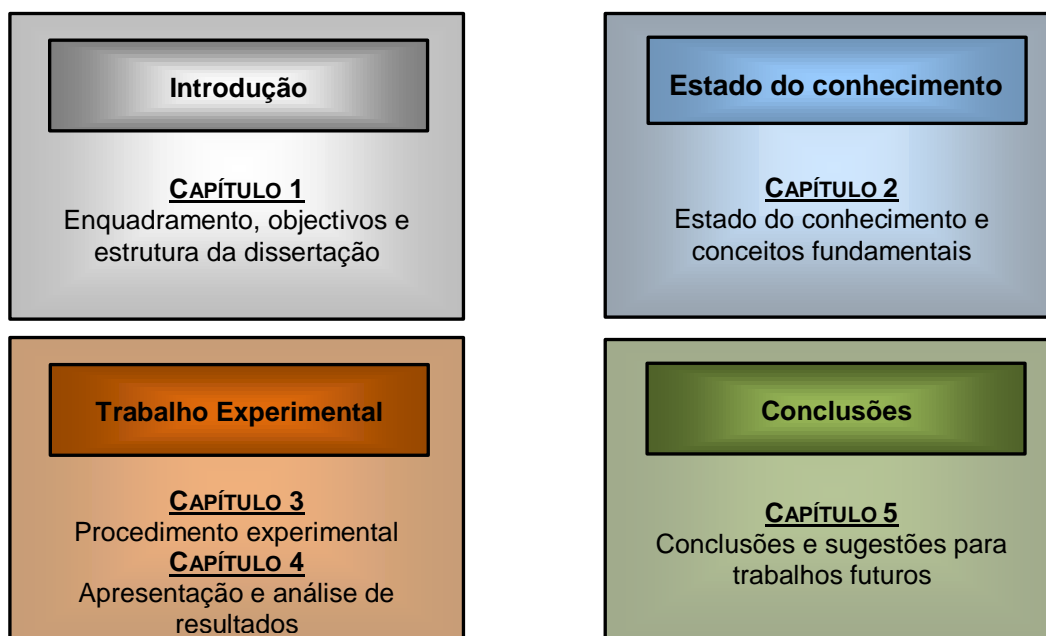


Figura 1.1 - Estrutura da dissertação por capítulos

Introdução – No capítulo 1 faz-se um enquadramento geral sobre o tema do trabalho, definem-se os objectivos e o modo de organização do presente documento.

Estado do Conhecimento – Para a elaboração do capítulo 2 (estado do conhecimento) fez-se uma intensiva pesquisa bibliográfica para obter conhecimentos para a execução do trabalho em estudo e apresenta-se uma descrição sobre os temas abordados. Descrevem-se as matérias-primas, as argamassas e a normalização utilizada.

Trabalho Experimental – Os capítulos 3 e 4 correspondem à aplicação do conhecimento onde é explicado o procedimento experimental e são apresentados e discutidos os resultados experimentais. No capítulo 3 descreve-se toda a fase experimental, desde os materiais utilizados até às condições de cura, bem como a descrição das argamassas produzidas. São também explicados todos os ensaios realizados, bem como os respectivos procedimentos experimentais para a fabricação e caracterização das argamassas. No capítulo 4 são apresentados, discutidos e analisados os resultados dos ensaios obtidos na campanha experimental, fazendo-se uma comparação com outros estudos realizados.

Conclusões - Finalmente, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões, as contribuições propostas no presente trabalho e ainda sugestões para desenvolvimentos futuros.

2. Estado do Conhecimento

2.1. Introdução

O sector da construção em Portugal, à semelhança do que acontece em outros países, é uma actividade de primordial importância no contexto económico e social do nosso país, porque além de ser uma fonte directa de emprego, movimenta grandes volumes de recursos financeiros.

Devido à situação particularmente difícil que o nosso País atravessa, é indiscutível que o sector da construção enfrenta a mais profunda e prolongada recessão da sua História, resultante da forte contracção do investimento público, empresarial e particular que se tem verificado, proporcionando um enquadramento económico bastante desfavorável. Confrontado com esta conjuntura de elevadas restrições orçamentais, *“a sustentabilidade da economia portuguesa tem-se colocado cada vez mais no plano da procura de um novo paradigma económico, assente na melhoria da competitividade, na atracção do investimento e na promoção do desenvolvimento sustentável. É a concretização desse desígnio que levará, inevitavelmente, a um novo ciclo de recuperação do Sector, um caminho que é necessariamente difícil, mas que terá de ser percorrido o quanto antes”* [AICCOPN, 2011].

Pese embora a actual conjuntura económica, a construção em Portugal nas últimas décadas tem sido excessiva, nomeadamente ao nível da construção nova quer de edifícios, quer de infra-estruturas. Porém nos últimos anos tem-se verificado um decréscimo no ritmo de construção nova, conduzindo o sector na procura de alternativas, entre as quais a reabilitação (Figura 2.1), que é, com frequência, mais complexa do que a construção corrente e exige minúcia, rigor e uma maior qualificação das empresas e dos profissionais [PIRES & BRAGANÇA, 2011; CÓIAS, 2012].

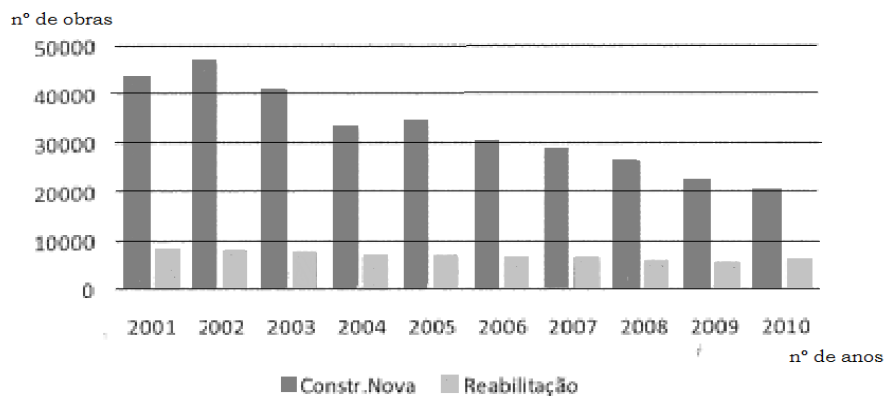


Figura 2.1- Proporção das obras de reabilitação do edificado relativamente às construções novas de edifícios de habitação (INE) [PIRES & BRAGANÇA, 2011]

A necessidade de investir na reabilitação urbana é actualmente um tema de grande importância para o País, bem como uma oportunidade de intervenção activa de modo a revitalizar as cidades e melhorar o desempenho do meio edificado.

Torna-se imprescindível o desenvolvimento de processos de reabilitação urbana devido à degradação física dos edifícios, que traduz-se em condições de conforto e de habitabilidade inaceitáveis para os ocupantes, bem como a degradação do edificado que afecta a qualidade do tecido urbano, influenciando negativamente a imagem, a vitalidade, a competitividade e a atractividade das nossas cidades. Além disso, esta área do sector da construção é também uma actividade geradora de emprego, forte dinamizadora da economia e com elevadíssimos valores de incorporação nacional, que proporciona um desenvolvimento de novas competências viradas para o futuro, nomeadamente nas áreas da eficiência energética ou da construção sustentável [CORREIA, 2009].

No entanto, Portugal apresenta-se ainda como um dos países da Europa em que a reabilitação representa um menor peso na produção total da construção. Os números são referidos por Manuel Reis Campos, presidente da Confederação Portuguesa da Construção e do Imobiliário (CPCI), que diz “enquanto na Europa a reabilitação representa 36,8% de toda a produção da construção, em Portugal o peso da reabilitação no total do sector é de 6,5%.” Que completa a informação dizendo que o peso da reabilitação equivale “a pouco mais de um sexto do que se produz em termos de habitação”. O presidente da Associação das Empresas de Construção, Obras Públicas e Serviços (AECOPS), Ricardo Pedrosa Gomes reforça esta ideia, considerando que “O peso da reabilitação não aumentou significativamente no total da produção da construção e não contribuiu para atingir níveis que invertessem a actual curva descendente de um sector que está em crise profunda” [CARVALHO, 2012].

No contexto da conservação e reabilitação do património edificado, a importância das argamassas de substituição têm vindo a assumir um papel de especial relevância, sendo alvo de discussão e análise [TORRALBA et al., 2011].

2.2. Materiais constituintes das argamassas

2.2.1. Ligantes

Um ligante é um produto que tem a capacidade de aglomerar outros materiais, tais como agregado grosso ou areia e que ao endurecer confere ao conjunto coesão e resistência [BOTAS, 2009; COUTINHO, 2006].

De acordo com a sua origem, os ligantes podem ser classificados como orgânicos ou minerais. Os de natureza orgânica são obtidos a partir de substâncias animais ou vegetais ao passo que os de natureza mineral são obtidos a partir de rochas naturais, como calcários ou mármore, com determinados teores de argila [MARGALHA, 2011]. No grupo de ligantes minerais inserem-se os ligantes hidráulicos e os aéreos.

Segundo Coutinho [COUTINHO, 2006], a classificação dos ligantes pode também ser realizada de acordo com a sua afinidade com água, dividindo os ligantes em hidrófobos e hidrófilos. Um ligante hidrófobo é um ligante em que a água não tem qualquer papel na produção e endurecimento do aglomerante, como o alcatrão ou resinas sintéticas. Um ligante hidrófilo tem afinidade com a água e misturado com ela forma uma pasta e endurece, como é o caso dos ligantes hidráulicos e aéreos.

Os ligantes hidráulicos são constituídos por pós muito finos e têm a propriedade de fazer presa (endurecer) em contacto com o ar ou com a água, caso da cal hidráulica e do cimento. Os ligantes aéreos, pelo contrário, não podem endurecer dentro de água, pois dependem do dióxido de carbono da atmosfera para fazer presa, caso da cal aérea [FARIA, 2004].

Posto isto, é pertinente abordar os ligantes hidrófilos de origem mineral uma vez que são os principais materiais utilizados na produção das argamassas, em particular a cal hidráulica dado que é o ligante usado ao longo do presente trabalho.

2.2.1.1. Cal hidráulica

A matéria-prima da cal hidráulica é a pedra calcária com quantidades de argila compreendidas entre 5% e 20% que, quando tratada termicamente a cerca de 900 a 1200 °C dá origem ao óxido de cálcio, que reage e se combina com a sílica, a alumina e o óxido de ferro. Designam-se por cais hidráulicas os produtos formados por estes silicatos e aluminatos de cálcio, que hidratando-se, dão origem a produtos que endurecem tanto na água como ao ar [FARIA, 2004].

O processo de endurecimento da cal hidráulica ocorre em duas fases, a fase hidráulica e a aérea. Na fase hidráulica dá-se a hidratação dos silicatos e dos aluminatos após a amassadura e na fase aérea ocorre a reacção do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono da atmosfera [SEQUEIRA *et al.*, 2007; MARGALHA, 2011; COUTINHO, 2006].

De acordo com a nova versão da norma NP EN 459-1: 2011 [IPQ, 2011], que resulta da EN 459-1: 2010, as cais de construção com propriedades hidráulicas podem classificar-se como cais hidráulicas naturais (NHL), cais hidráulicas (HL) ou cais formuladas (FL). De modo a tornar mais rigorosa a constituição destas cais, são exigidos determinados parâmetros, nomeadamente ao nível do teor em hidróxido de cálcio livre, sulfatos e adições permitidas. As cais hidráulicas naturais são produzidas à temperatura de aproximadamente 900 a 1200°C, a partir de calcários com alguma percentagem de argila, porém, estas não podem conter outras adições. Por outro lado, as cais hidráulicas (não naturais) e as cais formuladas podem conter algumas adições (tal como gesso, filleres ou clinquer do cimento Portland) e são geralmente produzidas a temperaturas superiores [FARIA, 2012].

As cals hidráulicas naturais são classificadas como NHL2, NHL3,5 e NHL5 de acordo com a classe de resistência à compressão (em MPa) aos 28 dias, representada pelo número junto ao tipo de cal hidráulica. A produção de cal hidráulica natural depende da natureza e da mineralogia da rocha calcária (daí não ser produzida em muitos países), das condições de cozedura e do tipo de forno utilizado. Portugal é um dos poucos países do mundo produtores de cals hidráulicas naturais NHL3,5 e NHL5, nomeadamente pelo grupo Secil-Martingança [FARIA, 2012]. A cal hidráulica natural NHL5 produzida pelo grupo Secil-Martingança é obtida por cozedura de calcário argiloso, seguida de moagem e extinção controlada. Segundo indicação do fabricante esta cal hidráulica é classificada na classe de resistência NHL5 e é um ligante constituído essencialmente por silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio [FARIA, 2004].

Comparativamente ao cimento, a cal hidráulica natural constitui um ligante hidráulico mais sustentável (obtida a temperaturas inferiores), sendo também potencialmente mais compatível com as características dos suportes antigos.

As cals hidráulicas naturais diferem das cals aéreas por endurecerem em contacto com a água e terem a capacidade de efectuar esse endurecimento mesmo em imersão em água, já que nas cals aéreas não há endurecimento se não existir contacto com o dióxido de carbono [FARIA, 2012].

2.2.2. Pozolanas

As pozolanas são definidas como materiais siliciosos ou silico-aluminosos que possuem poucas ou nenhuma propriedade aglomerantes e hidráulicas, mas quando utilizadas em granulometrias muito finas e na presença de água, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedades hidráulicas [VELOSA *et al.*, 2007; FARIA, 2004].

Os Gregos, seguidos pelos Romanos, foram as primeiras civilizações a utilizar pozolanas para a produção de argamassas de cal. Os Romanos descobriram que misturando uma cinza vulcânica com cal, obtinham uma argamassa que endurecia com a água, mais resistente e duradoura [RUSKULIS, 2002]. Até ao início do século XIX, as argamassas com propriedades hidráulicas eram confeccionadas quase exclusivamente com cal aérea e pozolanas como ligante. No entanto, com o aparecimento do cimento Portland as pozolanas foram esquecidas, caindo em desuso [FARIA, 2004].

O interesse na utilização de materiais pozolânicos aumentou após a descoberta do aumento da durabilidade e da existência de reacções alcali-agregado¹ no betão, sendo que estes componentes têm vindo a ser utilizados em cimentos pozolânicos e em betões de baixo calor de hidratação com altas resistências mecânicas [FARIA, 2004].

¹ A reacção alcali-agregado no betão é uma reacção química que ocorre entre os álcalis do cimento e os minerais dos agregados na presença de humidade. Os sintomas manifestados no betão são observados no decorrer dos anos, sob a forma de fissuras e deformações estruturais.

Relativamente à sua classificação é possível dividir as pozolanas em duas categorias: pozolanas naturais e artificiais. As pozolanas naturais são de origem vulcânica, sendo encontradas em zonas onde ocorrem ou ocorreram fenómenos vulcânicos. São materiais ricos em sílica, formados por acção do arrefecimento brusco das lavas vulcânicas que após a alteração por meteorização, ficam no estado amorfo. Este processo de meteorização da lava vulcânica possibilita uma maior reactividade pozolânica. Como estas pozolanas só por si apresentam propriedades hidráulicas, não necessitam de qualquer tratamento especial, a não ser a extracção e moagem [VELOSA *et al.*, 2007; FARIA, 2004; COUTINHO, 2006].

As pozolanas artificiais obtêm-se da calcinação de materiais naturais em condições específicas ou são provenientes de subprodutos industriais. Estes materiais naturais como argilas ou xistos, não apresentam propriedades pozolânicas, mas quando aquecidas a temperaturas entre os 500 e os 900°C, obtêm essas propriedades. Das pozolanas artificiais mais comuns, destacam-se as cinzas volantes, sílica de fumo e o metacaulino (menos conhecido) [VELOSA *et al.*, 2007; COUTINHO, 2006].

2.2.2.1. Metacaulino

O metacaulino é uma pozolana artificial obtida pela queima de argilas caulínicas (caulino) ao longo de um intervalo específico de temperatura (entre 600 e 850°C) [GLEIZE *et al.*, 2007; CACHIM *et al.*, 2010]. O tratamento térmico do caulino leva à perda de quase toda a sua água de constituição e à decomposição da estrutura cristalina, formando-se uma fase de transição com elevada reactividade pozolânica [SIDDIQUE & KLAUS, 2009]. A exposição contínua a temperaturas mais elevadas (acima de 900°C), promove a formação de mulite e consequentemente a perda da pozolanicidade [SAID-MANSOUR *et al.*, 2011].

A reactividade pozolânica óptima de um metacaulino depende da superfície específica, da cristalinidade de origem, da granulometria e do grau de amorfização. Materiais com elevada superfície específica e com baixas granulometrias aumentam a reactividade pozolânica [SAMPAIO *et al.*, 2001; CACHIM *et al.*, 2010]

De acordo com Siddique [SIDDIQUE & KLAUS, 2009], a utilização de metacaulino apresenta algumas melhorias em argamassas e betões, como o aumento da resistência à compressão e à flexão, redução significativa da permeabilidade, aumento da resistência aos ataques químicos, redução dos efeitos da reacção álcali-sílica, bem como o aumento da trabalhabilidade e durabilidade das argamassas e betões.

Como o sector da construção é dos mais poluentes a nível mundial, existe actualmente na indústria da construção uma maior consciência e preocupação ambiental. Quando comparado com os ligantes tradicionais, o metacaulino é um material mais sustentável já que a sua temperatura de calcinação é mais baixa, libertando assim menores quantidades de CO₂ para a atmosfera.

2.2.3. Agregados

Os agregados, constituintes praticamente inertes na formulação das argamassas, são utilizados com o intuito de diminuir a retracção, melhorar a resistência ao gelo, aumentar a resistência à compressão, aumentar a porosidade melhorando a permeabilidade ao vapor de água e obter soluções mais económicas já que permitem o recurso a uma menor dosagem de ligante. A utilização de agregados com granulometria adequada influencia a compacidade da argamassa, que por sua vez se reflectem no volume de vazios [PENAS, 2008; AGOSTINHO, 2008]. Podem ser classificados tendo em conta a dimensão das partículas, a sua origem e a sua massa volúmica, como naturais ou artificiais, grossos ou finos, leves ou de elevada massa volúmica [AGOSTINHO, 2008].

As areias são os agregados mais usados para o fabrico de argamassas e por serem o material que se encontra em maior quantidade numa argamassa, influenciam de uma forma significativa a estrutura porosa do material endurecido [RATO, 2006]. Uma areia com maior volume de vazios exige traços mais ricos em ligante que, com o aumento da quantidade de cal, podem apresentar consequências negativas ao nível da retracção da argamassa. Considera-se adequada uma areia bem graduada com menor volume de vazios.

“A areia funciona como o esqueleto da argamassa que ganha coesão pela ligação dos seus grãos ao ligante, pelo que a qualidade do agregado é fundamental no comportamento global da pasta. A mistura da areia separa as partículas de cal, o que facilita a reacção química da carbonatação e, por outro lado, permite distribuir as retracções que eventualmente ocorram por toda a massa” [MARGALHA *et al.*, 2011].

Relativamente à sua natureza, as areias podem ser de origem natural (areia natural) ou serem fabricadas por britagem (areia britada). As primeiras são de origem siliciosa, constituídas essencialmente por quartzo e são resultado da desagregação de rochas mais antigas, enquanto as segundas, normalmente apresentam natureza calcária (consoante da zona do País). Em Portugal as areias mais utilizadas provêm do rio, de areeiro ou da fragmentação de rochas [PENAS, 2008; RATO, 2006].

A forma das partículas de areia desempenha um papel importante no comportamento das argamassas, já que condiciona a aderência da pasta de ligante ao agregado, a trabalhabilidade no estado fresco, a compacidade do material, bem como valor da superfície específica [RATO, 2006]. *“Quanto mais angulosas forem as partículas, menor será a percentagem de vazios, conduzindo a uma menor quantidade de água de amassadura e uma menor quantidade de ligante, aumentando a compacidade da argamassa e a resistência mecânica”* [PENAS, 2008].

A granulometria das areias deve ser contínua e bem equilibrada, ou seja, deve ser constituída por uma mistura de partículas com dimensões mais finas e mais grossas, de modo a diminuir o volume de vazios. A utilização de uma granulometria adequada contribui para aumentar a resistência mecânica e a durabilidade das argamassas, permitindo ainda diminuir a dosagem de ligante. As areias mais grossas reduzem a tendência para fendilhação, enquanto as finas reduzem a porosidade e absorção de água das argamassas.

As areias utilizadas nas argamassas devem estar limpas de impurezas, sais e matéria orgânica e devem estabelecer uma boa ligação e compatibilidade com o ligante e com os restantes constituintes da argamassa, de modo a incrementar o desempenho da mistura [MARGALHA *et al.*, 2011; AGOSTINHO, 2008].

2.3. Argamassas – Exigências Funcionais das Argamassas

Uma argamassa é uma mistura constituída por pelo menos um ligante, areia e água, podendo eventualmente conter adjuvantes e/ou pozolanas, de modo a melhorar algumas das suas propriedades. Os ligantes mais utilizados na produção das argamassas são o cimento, cal aérea ou hidráulica e o gesso. Em relação aos agregados, o mais usado é a areia. Geralmente designam-se pelo seu ligante activo, nomeadamente, cal (aérea ou hidráulica), cimento ou gesso. Quando na sua composição são utilizados mais do que um ligante, as argamassas designam-se por mistas ou bastardas [COUTINHO, 1999; MARTINS & ASSUNÇÃO, 2010].

As principais funções exigidas a uma argamassa são quase sempre a protecção da alvenaria (evitando a degradação precoce das edificações, aumentando assim a sua durabilidade), auxiliar as alvenarias a cumprir as suas funções bem como assegurar o acabamento adequado à superfície. Para isso, devem apresentar determinadas características de modo a cumprirem adequadamente as suas funções, dependendo do tipo e aplicação a que vão ser sujeitas.

São produtos bastante utilizados na construção, tanto em construção nova como na reabilitação do edificado existente. Em construção nova, são utilizadas essencialmente no revestimento de paredes e tectos, no assentamento de alvenarias, no refechamento de juntas e na regularização de pavimentos e de coberturas [FARIA, 2012; HENRIQUES & FARIA, 2008]. *“Na conservação e na reabilitação de construções existente são também utilizadas para reparação de anomalias em elementos estruturais e em revestimentos, na substituição de rebocos que já não desempenham eficazmente o seu papel de protecção dos suportes, no tratamento de juntas que estejam ineficientes, entre outras aplicações”* [FARIA, 2012].

Os revestimentos exteriores de paredes, vulgarmente designados por rebocos, como são dos elementos mais expostos às acções climatéricas e de impacto ambiental, assumem grande importância nas intervenções em edifícios. Por este motivo, a grande maioria das argamassas tem sido recomendada para revestimentos de edifícios, em substituição dos originais [COUTO & COUTO, 2007].

Estas argamassas de substituição devem proteger a parede da acção directa dos agentes climatéricos, de acções mecânicas de choque, dos sais solúveis contidos nos na água e no solo, mas não devem contribuir para a degradação dos elementos pré-existentes, nem descaracterizar o edifício [COUTO & COUTO, 2007; MAGALHÃES & VEIGA, 2005; VEIGA, 2005].

A escolha de uma argamassa de substituição inadequada pode provocar degradação dos elementos pré-existentes, devendo por isso apresentar algumas características, das quais se salientam as seguintes [VEIGA, 2005; MAGALHÃES & VEIGA, 2005]:

- Deve dificultar a penetração da água no suporte, mas principalmente deve favorecer a evaporação da água que nele se introduz, pelo que a capilaridade, a permeabilidade ao vapor de água e a facilidade de secagem devem ser semelhantes às argamassas originais e superiores às do suporte;
- Apresentar alguma resistência mecânica, mas inferior à dos tipos de suportes sobre os quais se prevê que possam vir a ser aplicados;
- A aderência ao suporte deve ser suficiente para garantir a durabilidade da alvenaria;
- Deve apresentar também um bom comportamento ao gelo e aos sais solúveis existentes no suporte.

Após vários trabalhos desenvolvidos por Veiga [VEIGA, 2010], foram definidos intervalos de valores para algumas das características das argamassas de substituição para edifícios antigos, nomeadamente as características mecânicas e o comportamento face à água. Estes valores podem ser observados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Requisitos para as características das argamassas de revestimento para edifícios antigos [VEIGA, 2010]

Função	Características Mecânicas aos 90 dias			Comportamento à água
	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Ed [MPa]	CC [kg/m ² .min ^{0,5}]
Reboco exterior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000 – 5000	1,0 < CC < 1,5
Reboco interior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000 – 5000	1,0 < CC < 1,5
Refechamento de juntas	0,4 – 0,8	0,6 – 3,0	3000 – 6000	1,0 < CC < 1,5

Numa intervenção de reabilitação em um edifício, a primeira opção deve ser sempre a conservação dos revestimentos existentes. Contudo, existem situações em que é necessário substituir parcial ou totalmente as argamassas antigas, sendo fundamental escolher argamassas adequadas que funcionem de acordo com o uso específico para que foram destinadas as anteriores [VEIGA, 2003a]. A adequabilidade dos materiais a usar na realização de argamassas de substituição prende-se fundamentalmente com critérios de compatibilidade com o suporte que a recebe, de forma a contribuir para o bom desempenho global e para a durabilidade do edifício [VEIGA & AGUIAR, 2003; VEIGA, 2005].

Todavia, as argamassas recomendadas para intervenções em edifícios antigos (argamassas de cal aérea, hidráulica, cimento, entre outros) apresentam algumas inconveniências na sua utilização. As argamassas à base de cimento apresentam um aspecto final muito diferente das argamassas antigas, uma limitada capacidade de permitir a secagem da parede, uma rigidez excessiva e contêm na sua composição sais solúveis, que transportados para o interior das paredes originam fenómenos de cristalização, contribuindo para a sua degradação [VEIGA, 2003a]. As principais características destas argamassas são a elevada resistência mecânica, grande compacidade, elevada retracção, baixa permeabilidade ao vapor de água, baixa absorção capilar, baixa trabalhabilidade, tendência para fendilhação e alta resistência aos ciclos gelo/degelo

As argamassas com cal aérea constituem-se como soluções compatíveis com as alvenarias antigas, quer em termos de resistência, quer de deformabilidade. Uma vez que endurecem exclusivamente por reacções de carbonatação, a sua aplicação em ambientes com fraca presença de dióxido de carbono ou com presença elevada de água pode estar condicionada [MARTINS, 2010]. Apresentam geralmente uma boa capacidade de deformação, baixa resistência mecânica, baixa retracção (baixa fendilhação), absorção capilar elevada mas, em contrapartida, têm uma elevada permeabilidade ao vapor de água (facilita a evaporação de água que se encontre no interior dos elementos) [CAVACO, 2005].

As argamassas de cal hidráulica apresentam características intermédias entre as argamassas de cimento e as de cal aérea. A sua resistência e retracção são inferiores às do cimento (baixa fendilhação), mas superiores à das argamassas de cal aérea [AGOSTINHO, 2008]. Por serem bastante porosas, a velocidade de absorção de água é por vezes elevada, conduzindo a um coeficiente de capilaridade mais elevado do que nas argamassas de cimento, mas menor que nas argamassas com cal aérea [PENAS, 2008]. Estas argamassas possibilitam um maior intervalo de tempo entre o início e o fim de presa (maior tempo de trabalho para o operador) e comparadas com as argamassas de cimento, apresentam uma maior deformabilidade.

Existem ainda as argamassas designadas por bastardas que geralmente têm características intermédias entre as argamassas de um tipo de ligante apenas, aproveitando as boas mas também as más características de cada um [BOTAS, 2009]. Normalmente apresentam uma boa trabalhabilidade, redução da fendilhação por retracção, diminuição da contracção por secagem, boa impermeabilidade e uma rigidez intermédia.

Para cada situação de intervenção em edifício antigos deve-se ter em conta determinados factores, tais como as características do suporte, a época de construção do edifício, o tipo de edifício, a qualidade do revestimento, bem como as condições ambientais a que está sujeito [MASSENA, 2011; VEIGA, 2003].

2.4. Argamassas de cal hidráulica e metacaulino

As argamassas de cal hidráulica têm sido recomendadas como argamassas de substituição para intervenções em reabilitação de edifícios e apresentam, de um modo geral, propriedades intermédias entre as argamassas de cimento e as de cal aérea [AGOSTINHO, 2008; FARIA, 2004].

Estas argamassas possuem tendencialmente módulos de elasticidade dinâmicos e resistências mecânicas inferiores às argamassas de cimento. A sua elevada porosidade conduz a velocidades de absorção de água e coeficiente de capilaridade também elevados. Através da substituição parcial de cal por pozolanas, nomeadamente o metacaulino, têm-se obtido argamassas que demonstram bons resultados dado apresentarem melhor desempenho e serem mais sustentáveis [PENAS, 2008].

Actualmente existem diversos estudos sobre argamassas de cal aérea com pozolanas, mas ainda são poucos os estudos desenvolvidos sobre a caracterização de argamassas com base em cal hidráulica com adição de metacaulino. No entanto, no trabalho realizado por Bandeira [BANDEIRA, 2012], que continuou o estudo desenvolvido por Carneiro [CARNEIRO, 2012], caracterizaram-se argamassas de cal hidráulica natural NHL5 (produzida antes da entrada em vigor da nova versão da norma) ao traço volumétrico de 1:3, com substituições parciais de cal por metacaulino. Através destes estudos foi possível verificar a importância de uma cura húmida (cura a 95% de HR) nas propriedades mecânicas destas argamassas (independentemente do teor em metacaulino utilizado), constatando-se ainda que as argamassas com teores de 10% de metacaulino foram as que melhor desempenho obtiveram, apresentando características adequadas para serem usadas como argamassas de substituição.

O estudo desenvolvido por Grilo [GRILO, 2012], que caracterizou argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 ao traço volumétrico de 1:3, com substituições parciais de cal por metacaulino, mostrou que a inclusão de metacaulino nas argamassas apresenta melhorias nas suas características mecânicas, destacando a percentagem de 10% de substituição como a que melhores resultados apresentou. O autor conclui ainda que a inclusão de metacaulino otimiza o comportamento das argamassas face à água e que as argamassas sujeitas a uma cura húmida apresentam melhores características mecânicas.

A importância do metacaulino em argamassas de cal foi estudada por investigadores gregos [AGGELAKOPOULOU *et al.*, 2011], onde concluíram que as argamassas com adições desta pozolana apresentam propriedades mecânicas e microestruturais adequadas para serem usadas na reestruturação de alvenarias históricas. Num estudo realizado por investigadores checos [VEJMELKOVÁ *et al.*, 2012], onde se caracterizaram argamassas com base em cal hidráulica com adições de metacaulino, constatou-se que a substituição de 20% de massa de cal por esta pozolana foi a solução mais adequada do ponto de vista de aplicação na reabilitação de edifícios históricos, pois é a solução que apresenta melhores características mecânicas e menor coeficiente de absorção capilar.

Ao estudarem argamassas de cal hidráulica NHL5 (produzida antes da entrada em vigor da nova versão da norma) com substituições parciais de cal por metacaulino, sujeitas a diferentes condições de cura, alguns investigadores [CACHIM *et al.*, 2010] constataram que o metacaulino é um material adequado para ser usado como aditivo pozolânico, sendo a substituição de 20% de cal por metacaulino a que apresenta os melhores resultados. Estes investigadores concluíram ainda que as argamassas sujeitas a uma cura com humidade relativa de 95% são as que apresentam melhores características mecânicas, físicas e químicas.

Segundo Lanas [LANAS *et al.*, 2005], que estudou o comportamento mecânico de argamassas com base em cal hidráulica expostas a diferentes condições de cura, as argamassas sujeitas a condições de cura com maiores teores de humidade relativa apresentam de um modo geral maiores resistências mecânicas.

3. Procedimento Experimental

3.1. Introdução

No presente capítulo descrevem-se os materiais utilizados na produção das argamassas em estudo, bem como as metodologias e procedimentos dos ensaios realizados para caracterizar essas argamassas.

No âmbito dos projectos FCT METACAL E LIMECONTECH, financiados pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, desenvolveram-se e caracterizaram-se argamassas de cal hidráulica natural NHL5 com substituição crescente da massa de cal por igual massa de metacaulino.

A produção das argamassas foi realizada nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa (DEC/FCT-UNL).

A campanha experimental foi estruturada, organizada e planeada pela orientadora da dissertação, Professora Doutora Paulina Faria e tendo o seu desenvolvimento contado com o apoio do Engenheiro Vítor Silva (bolseiro da FCT-UNL) e dos colegas André Bandeira, Duarte Mergulhão e João Grilo, que paralelamente a esta dissertação desenvolveram estudos semelhantes.

Os ensaios para a caracterização das argamassas foram realizados no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa (DEC/FCT-UNL).

3.2. Matérias-primas utilizadas

3.2.1. Ligante

O ligante utilizado no desenvolvimento experimental para a realização dos provetes de argamassa foi a cal hidráulica natural Secil Martingança NHL5, produzida em Junho de 2011. Este produto é um lote distinto da até então comercializada pela Secil como NHL5 e da actualmente comercializada com o mesmo nome (desde Julho de 2012, com entrada em vigor da norma NP EN 459-1 [IPQ 2011]). A ficha técnica deste produto pode ser consultada em anexo (Anexo 1). A cal esteve acondicionada de modo a não hidratar e foi usada para o presente estudo em Março de 2012. Durante a realização do trabalho existiu também o cuidado de guardar o saco da cal num sítio seco, de modo a evitar o contacto com humidades.

3.2.2. Pozolana

Para a preparação das argamassas em que parte da massa de cal é substituída por uma pozolana, utilizou-se um metacaulino comercial francês Argical M 1200 S da marca Imerys, disponibilizado no âmbito do projecto METACAL pela empresa ao LNEC. Existiu também o cuidado de guardar o metacaulino em local seco, protegido de humidades, durante a realização do trabalho. A ficha técnica do metacaulino pode ser consultada em anexo (Anexo 2).

3.2.3. Agregado

Para a elaboração de todas as argamassas foi usado como agregado uma mistura de areias siliciosas lavadas e graduadas da AREIPOR com granulometrias diferentes, ao traço volumétrico 1;1,5;1,5 de APAS 12 (mais grossa), APAS 20 (intermédia) e APAS 30 (mais fina) respectivamente. A mistura de areias foi definida no âmbito dos projectos FCT METACAL e LIMECONTECH, de modo a obter uma mistura bem graduada com o menor volume de vazios possível. As areias foram fornecidas em sacas e utilizadas no estado seco.

Para caracterizar as areias e a mistura foram realizados no LNEC, no âmbito do projecto em estudo, ensaios de análise granulométrica e de determinação da baridade.

3.3. Argamassas produzidas e condições de cura

Foi realizada uma argamassa ao traço volumétrico de 1:3 (ligante: agregado) e a partir desta foram efectuadas substituições crescentes de massa de cal hidráulica por metacaulino (5, 10, 20%). Para cada argamassa foram realizadas duas curas distintas, obtendo deste modo 8 conjuntos de argamassas para ensaios.

Para uma melhor organização e mais fácil identificação, todas as argamassas foram identificadas com a letra R seguida de um número. Escolheu-se a letra R porque é a inicial do autor da dissertação e os números foram atribuídos de acordo com a execução das amassaduras, obtendo-se argamassas R1 até R8. Os casos R1 e R2 são argamassas em que o ligante utilizado foi apenas a cal hidráulica, R3 e R4 são argamassas de cal hidráulica com substituição de 5% da sua massa por metacaulino, R5 e R6, R7 e R8 são argamassas de cal hidráulica com substituição de 10% e 20% das suas massas por metacaulino, respectivamente.

Como na presente dissertação foram estudadas duas condições de cura distintas, uma cura de referência standard (Cura S - onde os provetes foram mantidos a condições de humidade relativa e temperatura controladas de $Hr=65\pm 5\%$ e $T=20\pm 3^\circ\text{C}$) e outra na estação de exposição natural do LNEC no Cabo Raso – Guincho (Cura M). As argamassas com numeração par correspondem a uma cura S, enquanto os de numeração ímpar correspondem a uma cura M.

Para uma melhor identificação das argamassas estudadas foram usadas designações próprias de acordo com o tipo de cal, a percentagem de substituição de metacaulino e o tipo de cura a que foram sujeitas.

Quadro 3.1 - Identificação das argamassas

Argamassa	Designação	Teor de metacaulino (%)
R1	NHL5_0Mk_M	0
R2	NHL5_0Mk_S	0
R3	NHL5_5Mk_M	5
R4	NHL5_5Mk_S	5
R5	NHL5_10Mk_M	10
R6	NHL5_10Mk_S	10
R7	NHL5_20Mk_M	20
R8	NHL5_20Mk_S	20

Para cada tipo de argamassa foram produzidos 12 provetes a fim de serem ensaiados aos 28, 90 e 180 dias. Para cada idade ensaiaram-se três provetes de cada argamassa, sobrando provetes para serem ensaiados a idades mais avançadas (1 ano ou idade mais avançada). Os provetes foram guardados na cura respectiva, ou seja, os números pares para uma cura standard, os números ímpares para uma cura marítima.

Todos os provetes realizados estiveram em sacos de plástico durante 7 dias (3 primeiros dias no molde), para desta forma promover a reacção pozolânica e de hidratação, sendo depois desmoldados.

3.4. Plano de trabalhos experimentais

Para uma melhor organização, dividiu-se o desenvolvimento experimental em três etapas distintas:

1ª Etapa – Caracterização das matérias-primas e definição das quantidades de constituintes de cada amassadura;

2ª Etapa – Preparação das argamassas e caracterização no estado fresco;

3ª Etapa – Caracterização das argamassas no estado endurecido.

Na 1ª etapa, realizada no LNEC e na FCT, fez-se a caracterização dos constituintes das argamassas, através dos ensaios de análise granulométrica e de determinação da baridade. Foram também definidas as quantidades de constituintes de cada amassadura, como a quantidade de água, cal, metacaulino e areias a utilizar.

Na 2ª Etapa foram feitas argamassas fazendo variar o teor de metacaulino e posteriormente realizados provetes de 40 x 40 x 160 (mm), colocados na respectiva condição de cura. A caracterização das argamassas no estado fresco foi conseguida através do ensaio de consistência ao espalhamento e foi feita no momento de execução das mesmas.

Na 3ª Etapa caracterizaram-se as argamassas no estado endurecido. Para isso procedeu-se à execução de ensaios mecânicos e físicos realizados aos 28, 90 e 180 dias de cura.

Quadro 3.2 - Ensaio realizados na caracterização no estado endurecido

Ensaio mecânicos:

- *Módulo de elasticidade dinâmico (E_d);*
- *Resistência à tracção por Flexão (R_t);*
- *Resistência à Compressão (R_c).*

Ensaio físicos:

- *Absorção de água por capilaridade;*
 - *Secagem;*
 - *Porosidade aberta (P_{ab});*
 - *Condutibilidade Térmica;*
 - *Resistência aos Sulfatos.*
-

3.5. Caracterização das matérias-primas

Para a caracterização das matérias-primas foram realizados ensaios de análise granulométrica e de determinação da baridade. A análise granulométrica, bem como a baridade das areias e do metacaulino foi realizada no LNEC pelo bolsheiro responsável do projecto METACAL, enquanto a baridade da cal foi realizada na FCT, no âmbito do projecto, aquando da dissertação do colega João Carneiro. Através da análise granulométrica pretende-se determinar a composição granulométrica do agregado utilizado na produção das argamassas, enquanto o ensaio de baridade tem como finalidade determinar a massa de agregado seco que enche um recipiente de volume conhecido. Com base no ensaio de baridade fez-se a conversão do traço volumétrico das argamassas em traço ponderal, permitindo quantificar as dosagens de material a usar.

Uma vez que estes ensaios fazem parte do trabalho experimental, decidiu-se incluir a descrição dos mesmos nesta dissertação.

3.5.1. Análise granulométrica

A granulometria dos agregados utilizados na fabricação de argamassas é uma das características que mais influência as características das argamassas [MARTINS, 2010]. Se a granulometria for contínua (partículas distribuídas uniformemente por todas as dimensões da mais pequena à maior) e se as partículas tiverem uma forma adequada, é possível obter uma argamassa mais compacta e resistente com menor dosagem de ligante, reduzindo-se assim o risco da separação dos constituintes das argamassas [COUTINHO, 1999; BOTAS, 2009]. Desta forma, é essencial realizar uma análise granulométrica por peneiração de maneira a encontrar uma mistura que garanta uma maior compacidade (baixo volume de vazios).

“A análise granulométrica de um agregado consiste simplesmente em separar uma amostra desse agregado em frações, cada uma contendo partículas com dimensões entre limites correspondentes às aberturas dos correspondentes peneiros” [COUTINHO, 1999].

Segundo vários autores [BOTAS, 2009], argamassas com maior quantidade de finos necessitam de uma maior adição de água, originando um maior número de fissuras por retracção na fase de endurecimento, enquanto areias com granulometria mais grossa melhoram a resistência das argamassas aos ciclos gelo-degelo.

O ensaio de análise à granulometria das areias utilizadas, baseou-se no disposto na norma NP EN 933-1: 2000 [IPQ, 2000] e foi realizado às areias APA.S 12, APAS 20, APAS 30, bem como à mistura das areias ao traço volumétrico 1:1,5:1,5, respectivamente. Os peneiros utilizados no ensaio estão em conformidade com as exigências da ISO 3310-1 [ISO, 2000].

Procedimento de Ensaio

Em primeiro lugar, as areias foram colocadas em estufa durante 24 horas a 110°C até se obter massa constante. Após a secagem em estufa dos agregados, foram retiradas quantidades de areias de cada granulometria, que posteriormente foram esquadreladas e pesadas [MASSENA, 2011]. Em seguida, a amostra de areia foi introduzida no peneiro de maior abertura de malha e colocou-se o conjunto de peneiros em vibração durante 1 minuto. “Os peneiros foram previamente encaixados uns nos outros, com um progressivo aumento da abertura da malha, de maneira a que o peneiro de baixo tenha malha com abertura inferior ao que se encontra por cima.” [PENAS, 2008]. Durante a peneiração as areias vão descendo por gravidade, ficando retidos num recipiente disposto a cada uma das diferentes granulometrias [PENAS, 2008]. Finalizada a peneiração, procedeu-se à pesagem do material retido em cada peneiro e determinou-se a percentagem de material que passa por cada um. Foram ensaiadas três amostras distintas para cada tipo de areia, a partir das quais foi feita uma média e procedeu-se ao traçado da curva granulométrica (Figura 3.1).

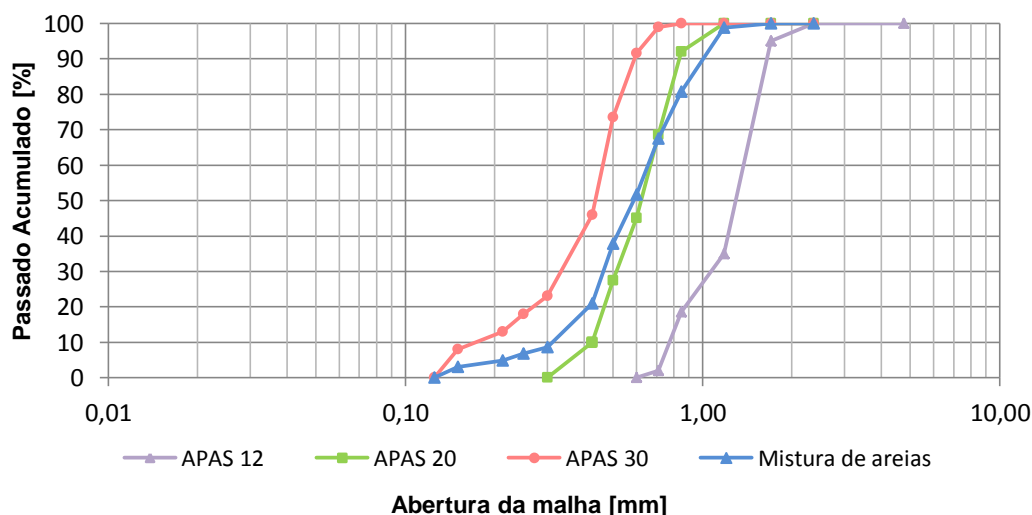


Figura 3.1 - Curva granulométrica das areias e da mistura de areias

3.5.2. Determinação da baridade

A determinação da baridade foi efectuada de acordo com a norma NP EN 1097-3 [IPQ, 2002] e pretende avaliar quais as quantidades necessárias de matérias-primas a utilizar em cada amassadura, consoante o traço volumétrico preestabelecido.

Na realização de actividades laboratoriais de modo a obter dosagens mais exactas, é conveniente transformar o traço volumétrico de uma argamassa em traço massa.

“O ensaio só pode ser efectuado para materiais granulares, já que contempla o volume de vazios que existem entre as partículas dos materiais. O valor da baridade depende do grau de compactação da amostra, bem como da granulometria e da forma das partículas” [MARTINS, 2010].

Procedimento de Ensaio

O material a ensaiar foi vertido para dentro do recipiente de volume já conhecido, através de um funil de sólidos, até se formar um cone no cimo do recipiente. Em seguida rasa-se o material em excesso com uma régua metálica, de maneira a não compactar o material que se encontra no recipiente e pesa-se o recipiente cheio com material numa balança de precisão 0,0001g. A baridade é obtida através da expressão:

$$Ba = \frac{(m_f - m_i)}{V} \quad [g/cm^2] \quad \text{(Equação 3.1)}$$

em que:

Ba – baridade [g/cm^3]

m_i – massa do recipiente [g]

m_f – massa do recipiente cheio com o material [g]

V – volume do recipiente [cm^3]

O resultado final de baridade resulta da média de três medições realizadas para cada material (areia, cal hidráulica e metacaulino). Estes valores podem ser encontrados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Baridade dos constituintes das argamassas

Baridade [g/cm^3]	
Cal hidráulica NHL5	0,821
Metacaulino	0,294
APAS 12	1,412
APAS 20	1,405
APAS 30	1,388
Mistura de areias	1,463

3.6. Formulações das argamassas estudadas

Para avaliar com precisão as quantidades de cada material necessárias para a obtenção dos provetes, procedeu-se à conversão do traço volumétrico das argamassas (1:3 - ligante e metacaulino: agregado) em traço em massa, multiplicando a componente volumétrica de cada constituinte da argamassa pela respectiva baridade.

Como estas argamassas constituem um conjunto de argamassas de base a serem estudadas no referido projecto, METACAL, foi previamente avaliada a quantidade de constituintes por amassadura (areias, cal e metacaulino) com vista à obtenção de argamassas comparáveis em termos de aplicabilidade e influência da água [MASSENA, 2011]. A quantidade de água utilizada foi definida pela orientação do trabalho no âmbito da dissertação do João Carneiro, que também realizou e caracterizou argamassas de cal hidráulica NHL5.

No Quadro 3.4 são apresentadas as quantidades em massa de cada constituinte da argamassa, nomeadamente as dosagens de metacaulino, cal hidráulica e areias, bem como o volume de água utilizado em cada amassadura

Quadro 3.4 - Dosagens por amassadura

Argamassa	Designação	Massa (g)					Volume de água (ml)
		Ar 12	Ar 20	Ar 30	Mk	NHL	
R1	NHL5_0Mk_M	1129,6	1686	1665,6	0,0	875,7	950
R2	NHL5_0Mk_S	1129,6	1686	1665,6	0,0	875,7	950
R3	NHL5_5Mk_M	1129,6	1686	1665,6	43,8	831,9	950
R4	NHL5_5Mk_S	1129,6	1686	1665,6	43,8	831,9	950
R5	NHL5_10Mk_M	1129,6	1686	1665,6	87,6	788,2	950
R6	NHL5_10Mk_S	1129,6	1686	1665,6	87,6	788,2	950
R7	NHL5_20Mk_M	1129,6	1686	1665,6	175,1	700,6	950
R8	NHL5_20Mk_S	1129,6	1686	1665,6	175,1	700,6	950

3.7. Preparação das argamassas e caracterização no estado fresco

3.7.1. Amassaduras

O processo de realização das amassaduras iniciou-se com a pesagem dos constituintes das amassaduras numa balança digital de precisão 0,1g (Figura 3.2a). Pesaram-se os três tipos de areias, cal hidráulica e metacaulino de acordo com as quantidades previamente definidas, conforme a argamassa a ser produzida.

Depois de pesados todos os constituintes secos, realizou-se uma homogeneização manual da mistura seca, sendo em seguida colocada na cuba misturadora mecânica (Figura 3.2b).

De seguida procedeu-se à medição da quantidade de água a adicionar para cada tipo de argamassa. Esta medição foi efectuada em provetes graduados e realizada sempre pela mesma pessoa com o intuito de minorar o erro.

Para se iniciar a produção da argamassa, colocou-se a misturadora mecânica em funcionamento durante 150 segundos, juntando-se nos primeiros 15 a 30 segundos a água à mistura (Figura 3.2c). Após os 150 segundos de funcionamento, parou-se a misturadora para que se procedesse à raspagem do material retido na pá da misturadora, bem como nas paredes e no fundo do molde (Figura 3.2d). Para finalizar, voltou-se a ligar a misturadora por mais 30 segundos sempre na velocidade mais lenta. Os passos descritos seguiram os procedimentos definidos no âmbito do projecto FCT METACAL [FARIA, 2011].

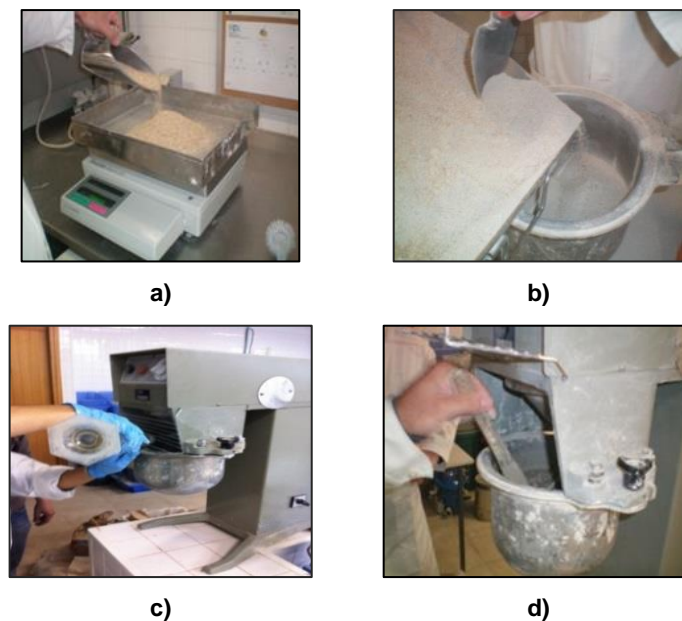


Figura 3.2 - Processo de realização das argamassas

3.7.2. Determinação da consistência por espalhamento

Após a execução das amassaduras realizou-se o ensaio de consistência por espalhamento (Figura 3.3) que permite analisar a influência da quantidade de água utilizada na argamassa fresca, permitindo também avaliar a sua trabalhabilidade.

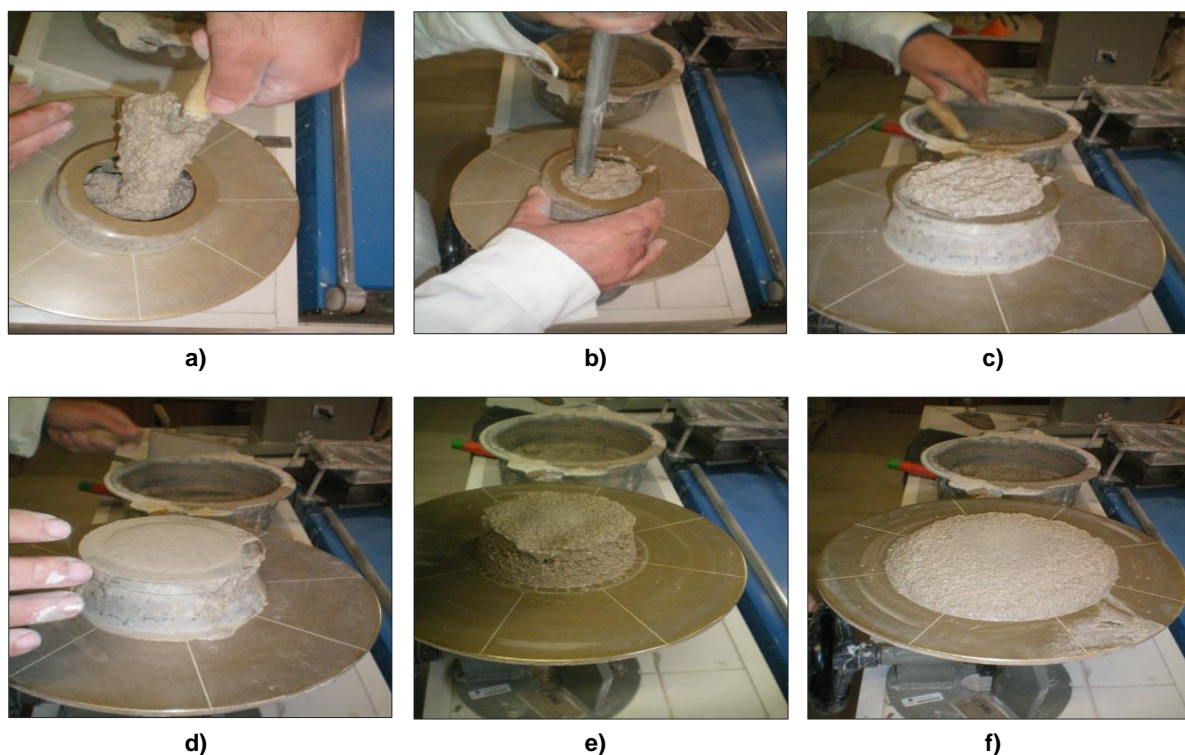
A trabalhabilidade é uma das mais importantes propriedades das argamassas no estado fresco e está directamente relacionada com a quantidade de água presente na mesma. Quanto mais água existir na argamassa maior a sua trabalhabilidade e melhor a sua aplicação em obra. Contudo, o excesso de água na argamassa vai provocar fenómenos de retracção que originam o aparecimento de fendas [FELGUEIRAS, 2011].

Este ensaio foi realizado no laboratório do DEC da FCT-UNL para todas as amassaduras, segundo a norma EN 1015-3 [CEN, 1999/2004/2006], de modo a verificar se os valores de espalhamento se encontravam dentro da gama de valores esperados (150 ± 10 mm). No laboratório do DEC da FCT-UNL a mesa de espalhamento não está de acordo com a norma EN 1015-3 [CEN, 1999/2004/2006] e como tal os valores obtidos podem diferenciaram-se um pouco do valor a atingir. Os resultados do ensaio de espalhamento estão condicionados pela influência humana, dado que a maneira de colocar e compactar a argamassa no molde, bem como o ritmo das pancadas na mesa de espalhamento diferem de acordo com o utilizador.

Procedimento de Ensaio

A realização deste ensaio começa com humedecimento da mesa de espalhamento, do cone, do varão e da colocação do cone no centro da mesa de espalhamento. Após a colocação do cone no centro da mesa, inicia-se o seu enchimento em duas camadas de argamassa de espessura semelhante, realizando em cada camada no mínimo 10 inserções do varão com o objectivo de eliminação de vazios. Depois de enchido o cone, rasou-se a superfície do mesmo retirando a argamassa em excesso e em seguida retira-se o cone. Com a amostra de argamassa no centro da mesa de espalhamento, rodou-se a manivela do equipamento de modo a este dar 15 quedas em 15 segundos.

Para avaliar a consistência ao espalhamento de cada argamassa, mediu-se com uma craveira e uma régua o diâmetro da argamassa em 4 direcções perpendiculares, tendo-se efectuada a média das 4 leituras, expressa em mm.



3.8. Execução dos provetes e condições de cura

3.8.1. Moldagem, desmoldagem e cura inicial dos provetes

A execução dos provetes teve como primeiro passo a colocação da argamassa em moldes prismáticos de 40x40x160 mm, previamente pincelados com óleo descofrante, com o intuito de facilitar a desmoldagem dos provetes. Começou-se por encher o molde com argamassa até mais de metade da sua altura (Figura 3.4a) e fez-se actuar o compactador até completar um total de 20 pancadas. Findo o enchimento do molde na sua totalidade, voltou-se a compactar com 20 pancadas. Por fim, após a compactação dos provetes, rasou-se o excesso de argamassa do molde (Figura 3.4b).

Nesta fase do trabalho houve uma alteração à norma EN 1015-11 [CEN, 1999/2006], já que foram realizadas 20 pancadas para cada enchimento do molde e a norma prevê 60 pancadas.

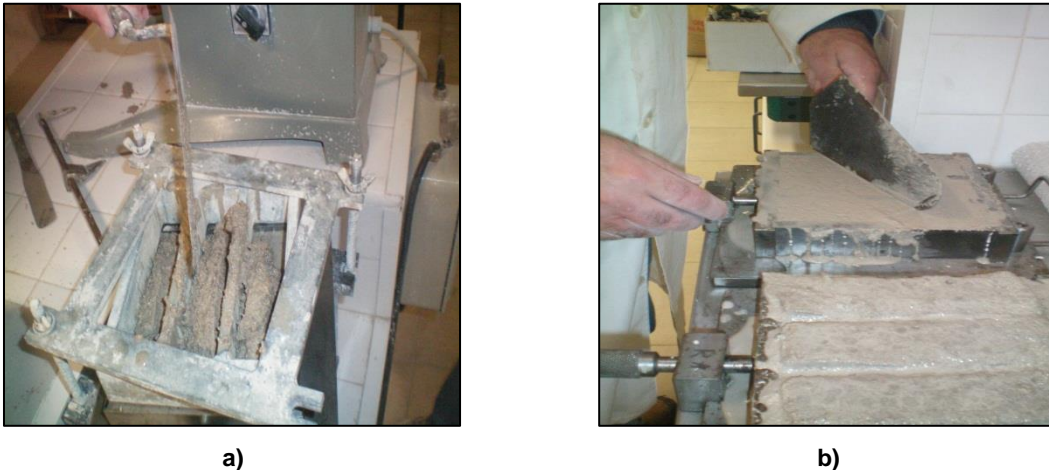


Figura 3.4 - Preenchimento dos moldes com argamassa e rasamento dos provetes após compactação mecânica

No fim da moldagem colocou-se os provetes em sacos de polietileno fechados (Figura 3.5a), durante os três primeiros dias, a fim de se obter uma evaporação de água mais lenta, mantendo a humidade relativa em valores mais elevados. No término dos três dias, procedeu-se à desmoldagem cuidadosa dos provetes (Figura 3.5b) com a preocupação de preservar a sua integridade, já que alguns ainda apresentavam resistências muito baixas e colocaram-se todos os moldes mais 5 dias em cura inicial no saco de polietileno.

Depois de desmoldados e terminada a cura inicial, procedeu-se à identificação dos provetes de acordo com o tipo de argamassa e condições de cura que iam ser sujeitos. Esta identificação dos provetes ocorreu segundo a sua execução cronológica.



a)



b)

Figura 3.5 - Cura inicial dentro de saco de polietileno e desmoldagem dos provetes

Terminado o processo de execução dos provetes, estes foram colocados em dois tipos de cura, de modo a analisar a influência da temperatura e da humidade relativa no comportamento das várias argamassas aos diferentes ambientes de cura.

3.8.1.1.Cura Standard

De forma a avaliar o efeito de uma cura em condições consideradas de referência, os provetes foram submetidos a condições de humidade relativa de $65\pm 5\%$ e temperatura de $20\pm 3^\circ\text{C}$ numa sala fechada e climatizada do DEC-FCT/UNL (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Provetes na sala de cura standard

3.8.1.2.Cura Marítima

Os provetes foram colocados numa cura em exposição natural em ambiente fortemente marítimo, na estação de exposição natural do LNEC situado no Cabo Raso-Guincho (Figura 3.7), onde permaneceram até à data de realização do ensaio (de Março a Setembro de 2012). De acordo com os procedimentos do projecto FCT METACL [FARIA, 2011] os provetes deveriam ser colocados na vertical, com o topo superior protegido e na zona exposta ao mar deveriam ser colocados blocos de madeira com a dimensão dos provetes.



Figura 3.7 - Provetes na estação de exposição natural do LNEC

3.9. Caracterização das argamassas no estado endurecido

Antes da realização de todos os ensaios, todos os provetes foram sujeitos durante 24 horas a ambiente controlado à temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de humidade relativa em sala própria, a fim de assegurar que atingiam condições mais uniformes [MASSENA, 2011].

Para a caracterização das argamassas no estado endurecido foram realizados ensaios aos 28, 90 e 180 dias. Como referido em 3.3, produziram-se 12 provetes de cada argamassa, tendo sido usados três provetes para cada ensaio a cada idade. Os 3 provetes que sobram de cada argamassa foram para a respectiva cura, de modo a serem estudadas a idades mais avançadas. Os resultados finais de cada ensaio resultam da média dos valores obtidos nos ensaios efectuados aos 3 provetes.

A ordem de execução dos ensaios foi a mesma para todas as idades. Como ponto de partida procedeu-se à determinação do módulo de elasticidade dinâmico e em seguida a determinação da resistência à tracção por flexão. Deste último ensaio resultaram duas metades de provete, uma para o ensaio de resistência à compressão e a outra para a execução dos ensaios de absorção de água por capilaridade, secagem, condutibilidade térmica e resistência aos sulfatos. Depois do ensaio de resistência à compressão resultaram 3 amostras da metade do provete. A base do provete foi usada na determinação da porosidade aberta e massa volúmica parente, enquanto as restantes amostras foram colocadas em sacos de plásticos fechados, uma para realizar no LNEC ensaios químicos, mineralógicos e microestruturais e a outra para estudos futuros.

3.9.1. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico permite avaliar a deformabilidade das argamassas, isto é, quanto maior o seu valor menor a deformabilidade da argamassa.

Como mencionado anteriormente, para determinação do módulo de elasticidade dinâmico usaram-se três provetes de cada argamassa e efectuou-se ensaios aos 28, 90 e 180 dias.

Este ensaio foi efectuado segundo a norma NP EN 14146 [IPQ, 2006], definida para ensaios de pedra natural e consiste na determinação da frequência de ressonância longitudinal por meio de equipamento adequado para a emissão de vibrações.

Os ensaios foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa DEC/FCT–UNL, através do equipamento “ZEUS Resonance Meter” (ZRM 001).

Procedimento de Ensaio

Todos os provetes a ensaiar foram previamente pesados numa balança com precisão de 0,01 g. Depois de pesados, os provetes foram individualmente colocados sobre um suporte do equipamento “ZEUS Resonance Meter” (Figura 3.8) e inseriu-se no programa de cálculo a massa e as dimensões do provete (40 x 40 x 160 mm). Para cada provete efectuaram-se no mínimo 4 medições do módulo de elasticidade, uma em cada face, mudando a posição do provete no equipamento.



Figura 3.8 - Equipamento “ZEUS Resonance Meter”

O programa de cálculo determina automaticamente o valor do módulo de elasticidade dinâmico através da expressão:

$$Ed = (2 \times L \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad \text{(Equação 3.2)}$$

Onde:

Ed - Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]

L - Comprimento do provete [m]

f_0 - Frequência de ressonância longitudinal [Hz]

ρ - Massa volúmica do provete [N/m³]

g - Aceleração da gravidade [9,8 m/s²]

3.9.2. Determinação da resistência à tracção por flexão

Para determinar a resistência à tracção por flexão utilizaram-se os provetes usados na determinação do módulo de elasticidade dinâmico e foram realizados ensaios mecânicos aos 28, 90 e 180 dias, de acordo com a norma EN 1015-11 [CEN, 1999/2006]. O equipamento utilizado na realização do ensaio foi o Zwick/Rowell, munido com uma célula de carga para flexão de 2kN.

Este ensaio consiste na aplicação de uma carga a meio vão do provete prismático. Regista-se a carga suportada pelo provete até à rotura e calcula-se a resistência à flexão do provete [MASSENA, 2011].

Procedimento de Ensaio

O provete foi colocado na prensa de flexão (Figura 3.9a), de modo a que ficasse centrado e com o eixo longitudinal perpendicular ao plano da força aplicada. Foi tido o cuidado de que a face rugosa (face exposta ao ar no molde) não ficasse em contacto nem com os apoios, nem com o ponto de aplicação da força, escolhendo-se aquela que não apresentava vazios como face a ser traccionada, isto é, face apoiada na prensa. De seguida foi aplicada uma carga até o provete atingir a rotura (Figura 3.9b) e através do equipamento registou-se a força máxima atingida pelo provete até à rotura. Depois da rotura ficamos com o provete dividido em duas partes, tendo este ficado partido na zona onde se aplicou a carga. Uma das metades do provete é utilizada na determinação da resistência à compressão e a outra para os ensaios de absorção de água por capilaridade, secagem, condutibilidade térmica e resistência aos sulfatos.

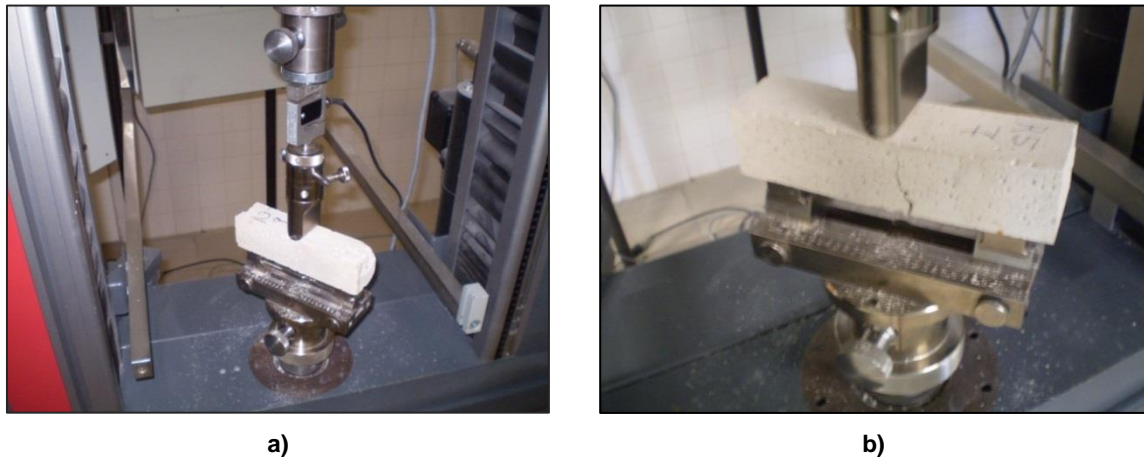


Figura 3.9 - Colocação do provete para ensaio de flexão e formação da superfície de rotura

A determinação da resistência à tracção por flexão foi calculada através da seguinte expressão:

$$R_t = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad [MPa] \quad \text{(Equação 3.3)}$$

Em que:

R_t - Resistência à tracção por flexão [MPa];

F_f - Carga de rotura à tracção por flexão [kN];

l - Distância entre apoios [mm];

b - Lado da secção quadrada do provete [mm].

3.9.3. Determinação da resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão foi realizada após a conclusão do ensaio da determinação da resistência à tracção por flexão, segundo a mesma norma EN 1015-11 [CEN, 1999/2006], com o mesmo equipamento, mas utilizando uma célula de carga de 50 kN. Os provetes utilizados neste ensaio foram as metades resultantes da determinação da resistência à tracção por flexão.

Procedimento de Ensaio

O ensaio começa com a colocação do meio provete centrado na prensa de compressão, tendo existido o cuidado de colocar a face rugosa do provete de modo a que esta não estivesse em contacto com os apoios do aparelho como no ensaio realizado anteriormente (Figura 3.10a).

Posteriormente aplicou-se uma carga até à rotura do provete (Figura 3.10b) e registou-se o valor da força máxima de compressão, fornecido pelo equipamento de ensaio.

Registado o valor da força máxima de compressão, procedeu-se à determinação da resistência à compressão através da seguinte expressão:

$$R_c = \frac{F_c}{S} \quad [MPa] \quad \text{(Equação 3.4)}$$

Sendo:

R_c – Resistência à compressão [MPa]

F_c – Força máxima de compressão [kN]

S – Área secção de aplicação da carga [mm]

O ensaio dá-se por concluído depois da rotura do meio provete, recolhendo três amostras do mesmo. A base do provete será usada na determinação da porosidade aberta, enquanto a parte do meio e a outra base ficam guardadas na faculdade para estudos futuros.



Figura 3.10 - Colocação do provete para ensaio de compressão e formação da superfície de rotura

3.9.4. Determinação da absorção de água por capilaridade

Com este ensaio pretende-se determinar a quantidade total de água absorvida pela argamassa, dado pelo valor assintótico (VA), bem como a velocidade com que sucede, dado pelo coeficiente de capilaridade (CC).

A realização do ensaio de determinação de absorção de água por capilaridade foi efectuada com base nas normas EN 1015-18 [CEN, 2002] e EN 15801 [CEN, 2009], tendo sido feitas algumas alterações à norma, como o envolvimento das faces laterais dos provetes numa película aderente, ficando a base e o topo dos provetes sem película. Pretende-se assim assegurar uma absorção de água unidireccional sem perdas pelas faces laterais impermeabilizadas dos provetes. Outra das alterações realizadas foi a colocação de uma gaze na base do provete, presa com um elástico, com o intuito de minorar as possíveis perdas de massa da base.

Este ensaio foi realizado na sala de cura de referência do DEC/FCT-UNL, com temperatura e humidade relativa controladas, aos 28, 90 e 180 dias de idade das argamassas.

Os provetes utilizados para a realização deste ensaio foram os três meios provetes resultantes do ensaio de determinação da resistência à tracção e para garantir que atingissem uma massa constante, colocaram-se em estufa a 60°C, um mínimo de 2 dias antes do início deste ensaio.

Procedimento de Ensaio

Antes de se iniciar o ensaio procedeu-se à preparação dos provetes com a colocação de película aderente nas faces laterais para a garantir um fluxo ascensional e unidireccional da água, registando-se o valor da massa seca (sem gaze) dos provetes.

Ainda no processo de preparação dos provetes, colocou-se uma gaze na base de cada provete fixa com um elástico (por cima da película aderente), de forma a evitar o máximo de perdas de massa da base e de modo a não dificultar o processo de absorção de água (Figura 3.11). Os provetes foram novamente pesados, registando-se o valor da massa seca (com gaze).



Figura 3.11 - Aspecto dos provetes com gaze e película aderente

Depois de preparados e devidamente pesados todos os provetes, procedeu-se à preparação do equipamento para o ensaio. Foi utilizada uma caixa de plástico estanque onde se tentou criar condições de um ambiente saturado. Para isso, no interior da caixa foi colocado um tabuleiro com uma rede impermeável para servir como base de sustentação aos provetes e preencheu-se o tabuleiro com uma altura de lâmina de água de 5 mm. Com o auxílio de um esguicho garantiu-se esta altura de água ao longo de todo o ensaio, já que a absorção de água por vezes é muito elevada.

Seguidamente dá-se início ao ensaio com a colocação de todos os provetes no tabuleiro com a face de menor dimensão em contacto com a rede impermeável (Figura 3.12a). Foram efectuadas pesagens dos provetes numa balança de precisão 0,001 g aos 5, 10, 15 e 30 minutos, de hora em hora até o gráfico de absorção de água começar a estabilizar (cerca de 6 a 7 horas), às quais se seguiram pesagens com periodicidade de aproximadamente 24 horas até que a diferença de massas entre duas pesagens sucessivas fosse inferior ou igual a 1% (Figura 3.12b). Durante as sucessivas pesagens, tentou-se sacudir os provetes até perderem a água em excesso, evitando que esta caia sobre os outros provetes que se encontram dentro do recipiente. Existiu sempre o cuidado de manter a tampa do recipiente de plástico fechado entre pesagens, de forma a reduzir o volume de água evaporada, bem como manter o ambiente saturado dentro do recipiente. Em todas as pesagens existiu o cuidado de não contabilizar o peso da gaze, ficando só

o valor da massa do provete. Assim, em todas as pesagens subtraiu-se o peso da gaze molhada, à excepção da primeira pesagem onde se retirou o peso da gaze seca.

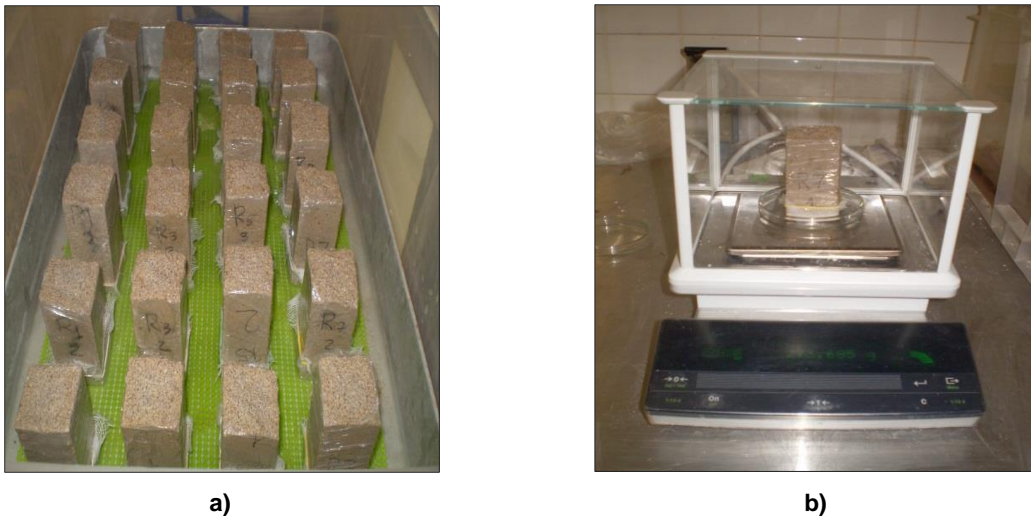


Figura 3.12 - Ensaio de Absorção de água por capilaridade: colocação dos provetes dentro do recipiente e pesagem dos provetes

“Com os dados obtidos para cada provete por tipo de cura, fez-se uma média da massa de água absorvida e, em seguida, traçou-se um gráfico com a curva de absorção capilar. Esta curva exprime, em massa, a quantidade de água absorvida por unidade de área da base do provete, em função da raiz quadrada do tempo i , em minutos” [MARTINS, 2010]. A quantidade de água absorvida foi calculada através da seguinte expressão de cálculo:

$$m = \frac{m_i - m_0}{S} \quad [Kg/m^2] \quad \text{(Equação 3.5)}$$

em que:

m – quantidade de água absorvida, por unidade de superfície, no instante t_i , em kg/m^2

m_i – massa do provete ao fim do tempo t_i , em kg

m_0 – massa do provete seco (com gaze), no instante t_0 , em kg

S – secção do provete em contacto com a água (0,04x0,04 m), em m^2

Analisando os gráficos obtidos determinou-se o coeficiente de capilaridade (CC) e o valor assintótico (VA) de cada argamassa. O CC é dado pelo declive do troço inicial da curva de absorção capilar, não tendo de passar obrigatoriamente na origem, enquanto o VA corresponde à quantidade de água absorvida por capilaridade.

3.9.5. Determinação da secagem

Para a realização do ensaio de secagem foram usados os meios provetes saturados utilizados no ensaio anterior e teve-se como base as especificações da RILEM, assim como os estudos efectuados por Brito [BRITO, 2009; BRITO, 2011]. O ensaio foi realizado na mesma sala

que o ensaio de determinação de absorção de água por capilaridade, com temperatura ($20 \pm 3^\circ\text{C}$) e humidade relativa ($65 \pm 5\%$) controladas, aos 28, 90 e 180 dias de idade das argamassas

O início do ensaio de secagem coincide com o final do ensaio de determinação de absorção de água por capilaridade. Assim, para garantir uma secagem de água unidireccional sem perdas pelas faces laterais, optou-se por manter a película aderente nas faces laterais dos provetes.

Para avaliar a quantidade de água evaporada foram realizadas pesagens, em intervalos de tempo definidos, numa balança de precisão de 0,001g. O ensaio de secagem decorreu até se verificar que a massa dos meios provetes se aproximava da massa seca, ou quando a determinada altura a massa começou a aumentar em vez de continuar a diminuir ² [MARTINS, 2010].

Procedimento de Ensaio

No final do ensaio de absorção de água por capilaridade retirou-se a gaze molhada e o elástico a todos os provetes, mantendo a película aderente nas faces de maior dimensão. Em seguida os meios provetes foram pesados numa balança de precisão de 0,001g e posteriormente colocados na bancada metálica da sala de cura standard (Figura 3.13). Repetiu-se este processo de pesagem dos meios provetes de hora em hora, até 7 horas e depois de 24 em 24 horas até se verificar que a massa do provete se aproximava da massa do provete seco ou quando a massa do provete aumentasse.



Figura 3.13 - Ensaio de secagem

Efectuadas todas as pesagens, procedeu-se à determinação do teor de água obtido pela expressão:

$$W_t = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \quad [\%] \quad \text{(Equação 3.6)}$$

² Julga-se que este facto possa ter ocorrido porque os meios provetes começaram a absorver a humidade proveniente do ambiente da sala onde se encontravam no processo de secagem, ou devido à evolução do processo de carbonatação.

em que:

W_t – teor em água [%]

m_i – massa do provete no instante t_i [kg]

m_o – massa do provete seco [kg]

Com os valores de teor em água construiu-se um gráfico, que traduz a curva de secagem, relacionando o teor de água (%) em função do tempo (h) e determinou-se o índice de secagem (IS). O valor do índice de secagem regista a rapidez de secagem de cada argamassa produzida e foi obtido utilizando o método simplificado de integração numérica, regra do trapézio [BRITO 2009], através da equação:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [(t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2}]}{Q_{m\acute{a}x} \times t_f} \quad \text{(Equação 3.7)}$$

em que:

IS – índice de secagem

t_i – tempo de ensaio no instante i , em horas

t_f – tempo final do ensaio, em horas

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

$Q_{m\acute{a}x}$ – quantidade de água inicial, em % relativamente à massa seca

Através do declive inicial da curva de secagem determinou-se ainda a taxa de secagem.

3.9.6. Determinação da porosidade aberta e da massa volúmica aparente

Os ensaios para determinação da porosidade aberta foram realizados no DEC/FCT-UNL, com base na norma NP EN 1936 [IPQ, 2008], aos 28, 90 e 180 dias de idade das argamassas.

Como a presente norma foi estabelecida para ensaios a provetes de pedra natural, efectuaram-se algumas alterações à mesma das quais se destaca a colocação das amostras em collantes de vidro, a fim de evitar possíveis perdas de massa decorrer do ensaio.

Para a realização deste ensaio foram utilizados os topos dos meios provetes ensaiados à compressão que se encontravam a cerca de uma semana a 60°C numa estufa ventilada, com o intuito de atingirem uma massa constante.

Procedimento de Ensaio

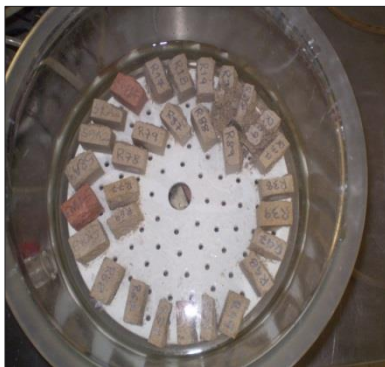
Os topos dos meios provetes que se encontravam em estufa a 60°C foram limpos de modo a remover todo o material solto e em seguida pesados numa balança de precisão de 0,01 g.

Preparadas as amostras a ensaiar, estas foram colocadas no exsicador em espiral de maneira a garantir um espaço livre entre cada amostra (Figura 3.14a). Depois das amostras se encontrarem dentro do exsicador e de este estar tapado, fez-se actuar a bomba de vácuo para retirar o ar do interior do exsicador (Figura 3.14b). As amostras estiveram nestas condições durante 24 horas até se atingir uma pressão de 20 Torr.

Ao fim de 24 horas encheu-se o exsicador com água até atingir uma altura um pouco superior à altura das amostras, ficando estas totalmente submersas (Figura 3.14c). O processo de introdução de água no exsicador foi feito de forma pausada e durante aproximadamente 15 minutos. As amostras ficaram nestas condições cerca de 24 horas.

Passadas 24 horas foi desligada a bomba de vácuo e aberta a tampa do exsicador permitindo a entrada e saída de ar, ficando as amostras imersas em água à pressão ambiente. Assim se manteve novamente durante 24 horas.

Com este processo finalizado, retiraram-se as amostras de dentro do exsicador e procederam-se às pesagens hidrostática e saturada. No primeiro caso utilizou-se um dispositivo em forma de cesto, preso inferiormente à balança e mergulhado dentro de água (Figura 3.14d), onde se colocou cada exemplar e se registou a sua massa hidrostática. Por cada 3 pesagens deste tipo fez-se uma da amostra saturada, tendo-se intercalado as mesmas com o propósito de, por um lado, não as deixar secar (caso se tivesse feito a pesagem hidrostática a todas elas) e por outro, deixar a amostra repousar uns instantes para perder o excesso de água superficial.



a)



b)



c)



d)

Figura 3.14 - Ensaio de porosidade aberta e massa volúmica aparente

Finalizado o ensaio, calculou-se a porosidade aberta e a massa volúmica. A porosidade aberta foi obtida através da expressão:

$$P_{ab} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 \quad [\%] \quad \text{(Equação 3.8)}$$

Sendo:

P_{ab} – Porosidade aberta [%]

m_1 – Massa da amostra do provete seco [g]

m_2 – Massa hidrostática da amostra do provete [g]

m_3 – Massa da amostra do provete saturado [g]

A massa volúmica aparente (MVA) foi calculada através da expressão:

$$MVA = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 10^3 \quad [Kg/m^3] \quad \text{(Equação 3.9)}$$

Sendo:

MVA – Massa volúmica aparente [Kg/m^3]

m_1 – Massa da amostra do provete seco [g]

m_2 – Massa hidrostática da amostra do provete [g]

m_3 – Massa da amostra do provete saturado [g]

3.9.7. Determinação da condutibilidade térmica

O ensaio de determinação da condutibilidade térmica foi também realizado a todas as idades das argamassas, na sala de cura standard do DEC/FCT-UNL com temperatura na ordem dos $20 \pm 3^\circ C$ e humidade relativa de $65 \pm 5\%$. Para este ensaio foram utilizados os meios provetes provenientes dos ensaios de absorção de água por capilaridade e secagem, sem a película aderente, que já se encontravam na sala de cura standard a fim de garantir as mesmas condições ambientais para todos os meios provetes.

A condutibilidade térmica revela a capacidade que os materiais possuem em conduzir calor. Materiais com elevada condutibilidade térmica, λ , conduzem o calor de uma forma mais rápida quando comparados com materiais com uma baixa condutibilidade térmica [PEREIRA *et al.*, 2012].

Para a medição da condutibilidade térmica foi utilizado o aparelho ISOMET 2104, sendo o procedimento do ensaio baseado no manual do aparelho. As medições realizadas pelo equipamento têm como base a análise de resposta térmica do respectivo material aos impulsos térmicos produzidos por uma resistência eléctrica inserida dentro de uma sonda, que está em contacto com o material em análise.

Tendo em conta que a dimensão mínima dos provetes a ensaiar é de 60mm de diâmetro e no presente estudo foram utilizados meios provetes com aproximadamente 40 mm de largura, não se garante precisão nos valores obtidos de coeficiente de condutibilidade térmica, uma vez que estes podem ser influenciados pelas menores dimensões do provete. “*No entanto, como as condições de análise foram iguais para todos os provetes, considera-se possível estabelecer uma comparação entre as diferentes argamassas*” [CARNEIRO, 2012].

Procedimento de Ensaio

O ensaio de condutibilidade térmica começou com a colocação do meio provete em cima de uma placa de polietileno expandido extrudido (XPS), colocada sobre a bancada metálica da sala de cura standard, para evitar que o calor se transmita para a bancada metálica.

Seguidamente, com o equipamento ISOMET 2104 (Figura 3.15), procedeu-se à medição da condutibilidade térmica, tendo-se realizado no mínimo 2 leituras por provete. Estas leituras foram realizadas com a sonda sobre uma das faces lisas do meio provete. A 1ª e a 2ª leitura foram executadas sobre uma das faces lisas do meio provete, que não fosse a oposta à face rugosa. Caso a diferença da 1ª para a 2ª leitura de valores de condutibilidade térmica fosse superior 5%, procedia-se a uma 3ª leitura sobre a face oposta à rugosa. Feitas todas as leituras de condutibilidade térmica, realizou-se a média por provete e por argamassa.



Figura 3.15 – Equipamento para medição da condutibilidade térmica

3.9.8. Determinação da resistência aos sulfatos

O ensaio decorreu no laboratório de ensaios mecânicos do DEC/FCT–UNL, aos 28 e 90 e 180 dias de idade de argamassas, baseado na norma NP EN 12370 [IPQ, 2001], desenvolvida para pedras naturais, e baseado no estudo de Faria (2004). Para este ensaio foram também usados os meios provetes resultantes dos ensaios de absorção de água por capilaridade e secagem, que até à data deste ensaio se encontravam na sala de cura standard com temperatura na ordem dos $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65 \pm 5\%$.

Procedimento de Ensaio

Antes de começar o ensaio, os meios provetes foram colocados na estufa a 105°C, durante aproximadamente 24 horas, até atingirem massa constante. Posteriormente procedeu-se à preparação do equipamento necessário para a determinação do ensaio da resistência aos sulfatos. Foi colocado no fundo de um uma caixa de plástico estanque um estrado de plástico para arrumar os provetes (de maneira a que não fiquem directamente em contacto com o recipiente) e preparou-se uma solução de sulfato de sódio que posteriormente foi colocada dentro do recipiente de plástico já preparado. Para esta solução foram colocadas 329g de sulfato de sódio para cada 10 litros de água. Procedeu-se à mistura de modo a dissolver o sulfato de sódio na água e colocou-se a solução já homogeneizada no recipiente de plástico.

Depois de secos em estufa, os meios provetes ficaram a arrefecer cerca de 15 minutos para poderem ser manuseados e pesados numa balança de precisão de 0,001g. Seguidamente, colocaram-se os meios provetes na caixa de plástico estanque de maneira a ficarem completamente imersos na solução preparada, afastados das paredes da caixa e espaçados entre si cerca de 1 cm (Figura 3.16a). As amostras estiveram fechadas neste ambiente durante 2 horas até serem retiradas (sacudindo-se bem para retirar a água em excesso) e mais uma vez colocadas em estufa a 105 °C, por aproximadamente 24 horas (Figura 3.16b).

Após colocados na estufa, os meios provetes foram novamente pesados, anotou-se a perda de massa e deu-se por concluído o 1º ciclo. O ensaio dá-se por terminado ao fim de 20 ciclos de imersão, secagem, pesagem ou até à destruição completa dos meios provetes.



a)



b)

Figura 3.16 - Ensaio de resistência aos sulfatos: colocação dos provetes dentro do recipiente e colocação na estufa.

4. Apresentação e Análise de Resultados

4.1. Introdução

No presente capítulo vão ser apresentados e analisados os resultados obtidos pelas argamassas nos ensaios definidos no plano de trabalhos experimentais, de forma a caracterizar as argamassas no estado fresco e no estado endurecido. A apresentação de resultados é feita sob a forma de tabelas, com o auxílio de gráficos para uma melhor análise e interpretação. Os resultados dos ensaios para caracterizar as argamassas no estado endurecido correspondem à média dos valores obtidos aos três provetes de cada argamassa específica.

4.2. Resultados referentes à caracterização das argamassas no estado fresco

A caracterização das argamassas no estado fresco foi realizada através do ensaio de determinação da consistência por espalhamento. O ensaio foi feito para os quatro tipos de argamassas diferentes.

4.2.1. Consistência por espalhamento

No âmbito do projecto em estudo procuram-se argamassas que apresentem boa trabalhabilidade, tendo-se para isso estipulado um intervalo de valores de espalhamento na ordem dos 150 ± 10 mm.

No Quadro 4.1 são apresentados os traços ponderais, as relações “água/NHL” e “água/(NHL + MK)”, bem como os valores médios do espalhamento para cada argamassa produzida.

Quadro 4.1 – Traços ponderais, razões água/ligante, espalhamento e respectivo desvio-padrão

Designação	Traço ponderal		Razão A/NHL	Razão A/(NHL+Mk)	Esp (mm)	
	[NHL:Mk:Ar12:Ar20:Ar30]	[NHL:Mk:Areias]			Média	DP
NHL5_0Mk	1:0:1,3:1,9:1,9	1:0:5,1	1,1	1,1	159	1
NHL5_5Mk	1:0,05:1,4:2,0:2,0	1:0,05:5,4	1,1	1,1	159	4
NHL5_10Mk	1:0,11:1,4:2,1:2,1	1:0,11:5,7	1,2	1,1	154	4
NHL5_20Mk	1:0,25:1,6:2,4:2,4	1:0,25:6,4	1,4	1,1	147	1

Através do ensaio da baridade fez-se a conversão do traço volumétrico “ligante: mistura de areias”, preestabelecido para cada argamassa (1:3), em traço ponderal. Como a quantidade de água utilizada foi a mesma para todas as argamassas, obteve-se uma igual razão “água/(NHL + MK)” e uma razão “água/NHL” crescente.

De acordo com as informações do quadro anterior verifica-se que os valores de espalhamento estão dentro da gama de valores estipulados (150 ± 10 mm). Observa-se que as argamassas sem metacaulino são as que apresentam maiores valores de espalhamento, enquanto as argamassas em que 20% de massa de cal é substituída por metacaulino são as que apresentam o valor mais baixo. Em termos gerais, pode-se dizer que a utilização de metacaulino conduz a menores valores de espalhamento, decrescendo este valor à medida que o teor de metacaulino aumenta.

Todos os valores de espalhamento obtidos podem ser consultados em anexo (Anexo 3).

4.3. Resultados referentes à caracterização das argamassas no estado endurecido

A caracterização das argamassas no estado endurecido foi realizada através dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão, resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, secagem, porosidade aberta, condutibilidade térmica e resistência aos sulfatos. Esta caracterização foi realizada para os oito conjuntos de argamassas e permitiu estudar a evolução das suas propriedades ao longo do tempo, consoante o tipo de cura a que foi sujeita.

Para ajudar na análise dos resultados no estado endurecido, decidiu-se que cada argamassa ensaiada corresponderia a uma cor. Seguiu-se sempre o mesmo código de cores durante a apresentação dos resultados, tendo sido definido que a cor **azul** corresponderia à argamassa NHL5_0Mk, a **laranja** à NHL5_5Mk, a **vermelha** à NHL5_10Mk e a **verde** à NHL5_20Mk.

4.3.1. Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) é um parâmetro que permite avaliar a rigidez das argamassas e fornece uma indicação relativamente à sua deformabilidade e às suas resistências mecânicas. Quanto mais elevado for o valor de E_d (maior rigidez), menor será a deformabilidade da argamassa.

O módulo de elasticidade dinâmico deverá ser menor ou igual ao do suporte, pois pretende-se que as argamassas possam acompanhar a deformabilidade dos suportes de modo a evitar o aparecimento de fissuras e a perda de aderência dos revestimentos [MARTINS, 2010].

No Quadro 4.2 são apresentados os valores médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dinâmico (E_d), para cada argamassa e respectiva condição de cura, aos 28, 90 e 180 dias.

Os valores de módulo de elasticidade obtidos para cada provete de argamassa podem ser consultados em anexo (Anexo 4).

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

Argamassa	Ed [MPa]					
	28 dias		90 dias		180 dias	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
NHL5_0Mk_M	2907	100	2051	120	1848	68
NHL5_0Mk_S	1749	90	1530	48	1355	80
NHL5_5Mk_M	2891	122	2079	34	1903	94
NHL5_5Mk_S	1692	112	1736	120	1536	69
NHL5_10Mk_M	4042	93	2477	166	2142	35
NHL5_10Mk_S	2656	323	2128	255	1891	111
NHL5_20Mk_M	2569	62	2075	124	2026	57
NHL5_20Mk_S	2218	80	1742	55	1688	24

De forma a facilitar a análise e comparação dos resultados de E_d , a Figura 4.1 mostra graficamente o valor do módulo de elasticidade dinâmico das diferentes argamassas e respectiva condição de cura, ao longo do tempo (28, 90 e 180 dias).

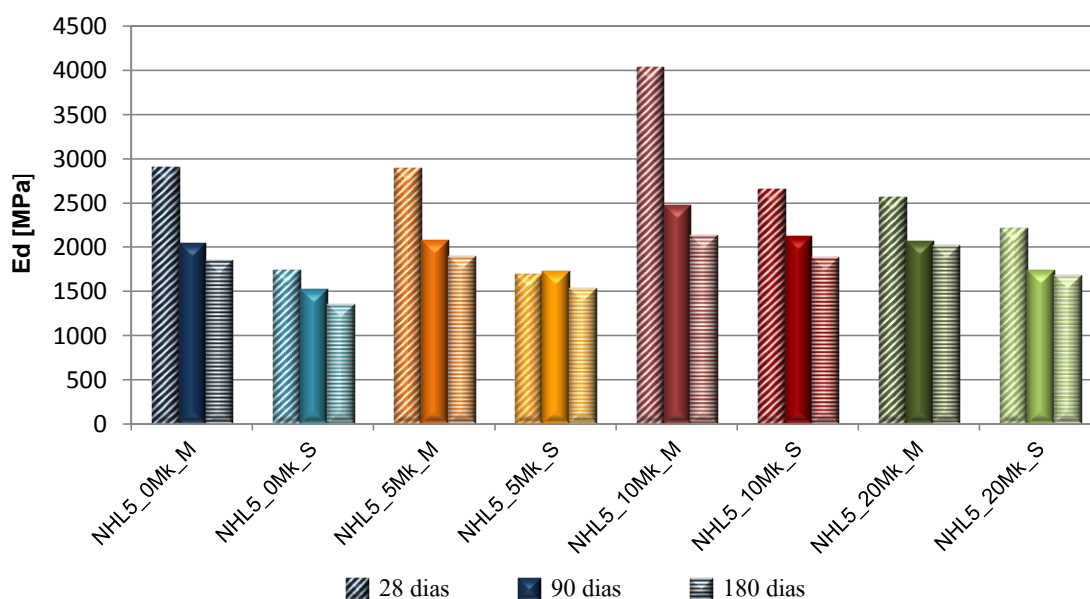


Figura 4.1 - Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas aos 28, 90 e 180 dias

Analisando o gráfico da Figura 4.1 destaca-se um padrão de valores de E_d decrescente ao longo do tempo para cada argamassa e condição de cura. Aos 28 dias registam-se sempre os maiores valores de E_d , enquanto aos 90 dias existe uma diminuição desses valores, à exceção da argamassa NHL5_5Mk_S que apresenta um valor ligeiramente superior. Aos 180 dias todas as argamassas diminuíram ligeiramente de valores comparativamente com os 90 dias. Consta-se que o maior valor de E_d verifica-se na argamassa NHL5_10Mk_M aos 28 dias e o menor valor na argamassa NHL5_0Mk_S aos 180 dias. Verifica-se ainda que as argamassas sujeitas a uma cura marítima apresentam a todas as idades valores de E_d superiores aos das argamassas idênticas sujeitas a uma cura standard.

Com o intuito de analisar a influência do teor de metacaulino em cada condição de cura, ao longo das três idades ensaiadas, apresentam-se nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 os valores de E_d obtidos para cada argamassa ensaiada.

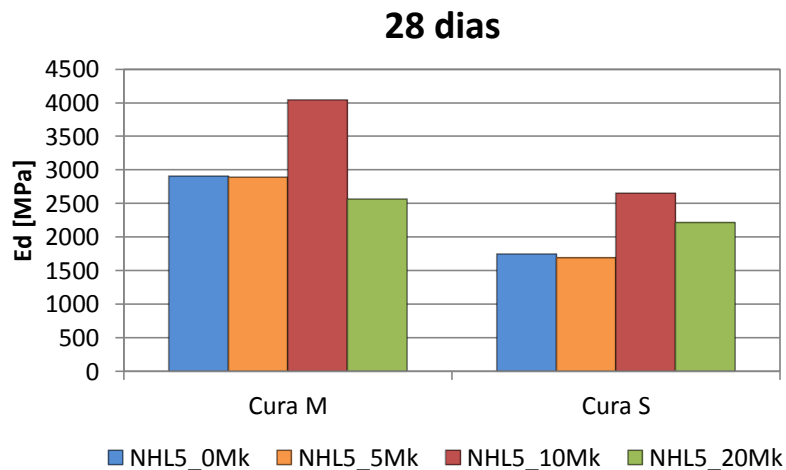


Figura 4.2 - Módulo de elasticidade dinâmico em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 28 dias.

De acordo com a Figura 4.2 é possível observar nas duas curas que aos 28 dias a percentagem de 10% de metacaulino em substituição parcial de massa de cal é a que apresenta os maiores valores de E_d . Relativamente à argamassa de referência, sem metacaulino, registou-se para ambas as curas um ligeiro decréscimo de E_d nas argamassas NHL5_5Mk e um considerável aumento na argamassa NHL5_10Mk. Na cura marítima, a argamassa NHL5_20Mk apresenta um valor inferior em relação à argamassa sem qualquer adição de metacaulino, enquanto na cura standard a argamassa NHL5_20Mk apresenta um valor superior à argamassa de referência, mas inferior à com 10% de metacaulino (NHL5_10Mk). É também possível verificar que a cura marítima conduz a valores mais elevados de módulo de elasticidade que a cura standard, sendo que esta tendência se mantém nas restantes idades, embora com menor expressão.

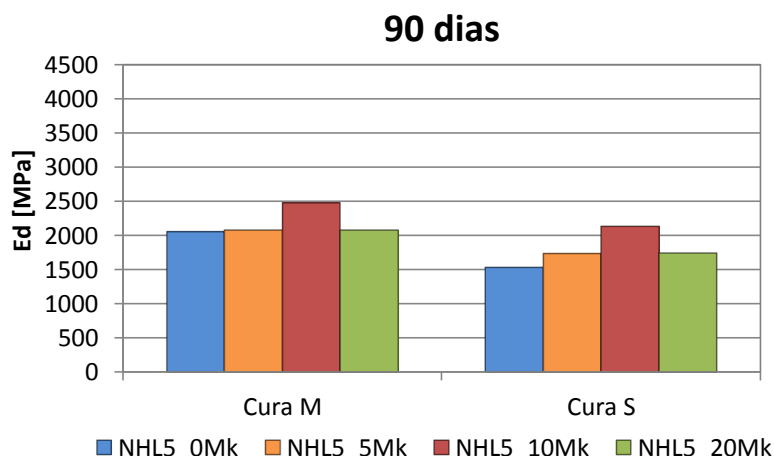


Figura 4.3 - Módulo de elasticidade dinâmico em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 90 dias.

Através da Figura 4.3 constata-se, como aos 28 dias, que a argamassa com 10% de massa de cal substituída por igual massa de metacaulino (NHL5_10Mk) é a que apresenta aos 90 dias o maior valor de Ed para ambas as curas. Analisando o gráfico observa-se que na cura marítima todas as argamassas apresentam valores semelhantes aos de referência, à exceção da argamassa NHL5_10Mk que apresenta um valor mais elevado. Na cura standart comprova-se que a crescente presença de metacaulino nas argamassas provocou um aumento na rigidez das mesmas, até à percentagem de substituição parcial de cal por 10% de Mk, não se verificando esse aumento na argamassa NHL5_20Mk, que apresenta um valor superior ao de referência, mas inferior à argamassa NHL5_10Mk.

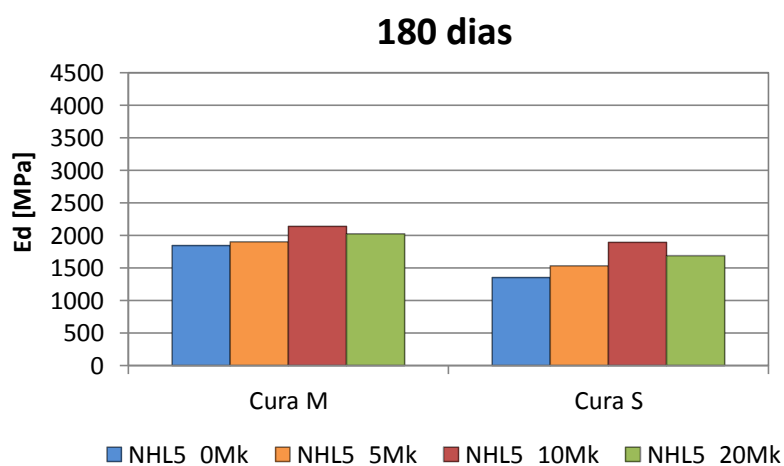


Figura 4.4 - Módulo de elasticidade dinâmico em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 90 dias.

Aos 180 dias é possível verificar, tal como sucedeu nas restantes idades, que os valores de E_d mais elevados em ambas as curas correspondem à argamassa NHL5_10Mk. Analisando a Figura 4.4 verifica-se para as duas curas um padrão de evolução do valor de módulo de elasticidade crescente com o aumento de metacaulino, incluindo a argamassa NHL5_10Mk, verificando-se um ligeiro abaixamento de valor para a argamassa NHL5_20Mk. Este padrão de evolução do módulo de elasticidade é menos acentuado nas argamassas sujeitas a cura marítima, já que os valores obtidos são bastante idênticos. A evolução crescente do valor de E_d não se verifica para a argamassa NHL5_20Mk, na medida em que apresenta para ambas as curas uma descida de valor em relação à argamassa NHL_10Mk contudo, face à argamassa de referência, apresenta uma pequena subida.

4.3.2. Resistência à tracção por flexão

Apresentam-se no Quadro 4.3 os valores médios e desvio padrão da resistência à tracção por flexão, R_t , de todas as argamassas e respectiva condição de cura para as várias idades de caracterização (28, 90 e 180 dias).

Os valores de resistência à tracção por flexão obtidos para cada provete de argamassa podem ser consultados em anexo (Anexo 5)

Quadro 4.3 - Valores médios e desvios padrão da resistência à tracção por flexão

Argamassa	Rt [MPa]					
	28 dias		90 dias		180 dias	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
NHL5_0Mk_M	0,36	0,02	0,25	0,02	0,21	0,02
NHL5_0Mk_S	0,20	0,01	0,15	0,03	0,13	0,00
NHL5_5Mk_M	0,29	0,04	0,29	0,03	0,28	0,02
NHL5_5Mk_S	0,20	0,00	0,21	0,02	0,27	0,00
NHL5_10Mk_M	0,42	0,03	0,31	0,06	0,38	0,02
NHL5_10Mk_S	0,34	0,06	0,23	0,04	0,34	0,05
NHL5_20Mk_M	0,31	0,02	0,29	0,02	0,47	0,03
NHL5_20Mk_S	0,24	0,01	0,23	0,01	0,36	0,01

Para uma melhor percepção e comparação dos resultados obtidos, na Figura 4.5 apresenta-se em forma de gráfico a evolução da resistência à tracção por flexão de todas argamassas e respectivas curas com a idade.

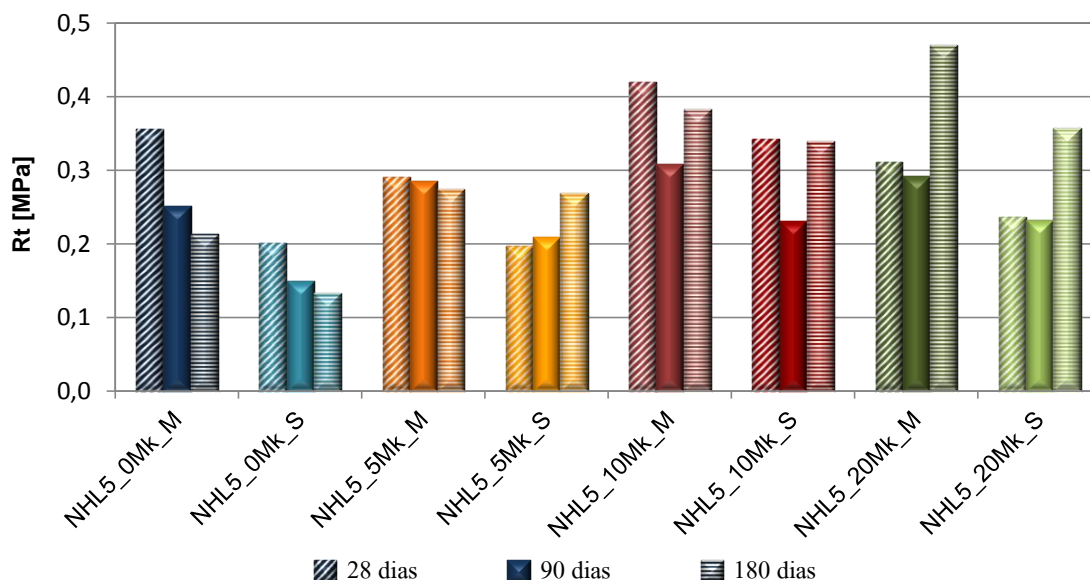


Figura 4.5 - Resistência à tracção por flexão das argamassas aos 28, 90 e 180 dias

Pela análise da Figura 4.5 é possível verificar que não existe um padrão definido de evolução dos valores de R_t para cada argamassa e respectiva cura ao longo das três idades. As argamassas sem metacaulino e a argamassa NHL5_5Mk_M indicam um decréscimo do seu valor ao longo do tempo, todavia, esta diminuição de valores não é tão evidente na argamassa NHL5_5Mk_M, que apresenta valores praticamente idênticos a todas as idades. Nas argamassas com 10% e 20% de Mk, bem como a argamassa NHL5_5Mk_S, observa-se que os valores de R_t aos 28 dias apresentam um valor mais elevado que o registado aos 90 dias. Tal facto não se verificou apenas na argamassa NHL5_5Mk_S, onde se registou valores crescentes com a idade. Dos 90 para os 180 dias, as argamassas com 10% e 20% de Mk registam um aumento do valor de R_t , contudo, nas argamassas com 20% de Mk registam-se valores superiores aos obtidos aos 28 dias. A Figura 4.5 permite facilmente constatar que para todas as idades é na cura marítima que se registam os valores mais elevados de R_t , comparativamente às de cura de referência standard.

De acordo com as Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 é possível observar a evolução dos valores obtidos de R_t para cada argamassa, de modo a analisar a influência do teor de metacaulino, em cada condição de cura, ao longo das três idades.

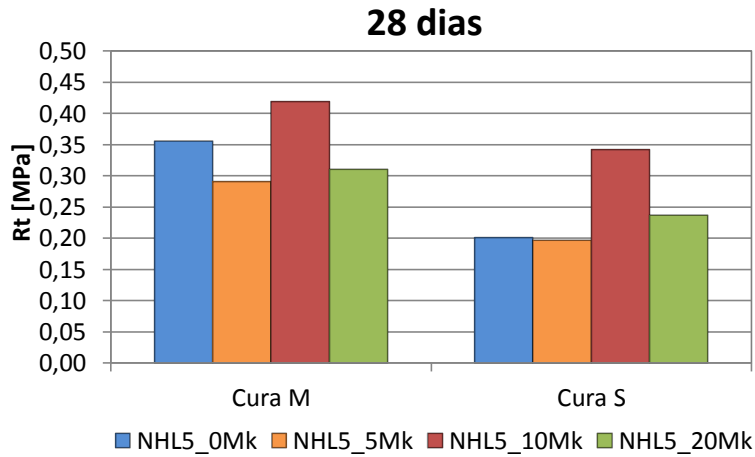


Figura 4.6 - Resistência à tração por flexão em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 28 dias.

Aos 28 dias (Figura 4.6), observa-se para ambas as condições de cura que a argamassa NHL5_10Mk é aquela que apresenta os maiores valores de resistência à tração por flexão, não se registrando um aumento de Rt constante com o aumento do teor de Mk. Na cura marítima apenas a argamassa com 10% de Mk atingiu valores superiores à de referência, sem metacaulino, enquanto as argamassas NHL5_5Mk e NHL5_20Mk apresentam valores semelhantes, mas inferiores às restantes argamassas. Na cura standard a argamassa NHL5_5Mk apresenta um valor idêntico à argamassa sem Mk; na argamassa NHL5_10Mk verifica-se um aumento do valor de Rt, enquanto a argamassa com 20% de Mk regista um valor superior à de referência, mas inferior à com 10% de metacaulino.

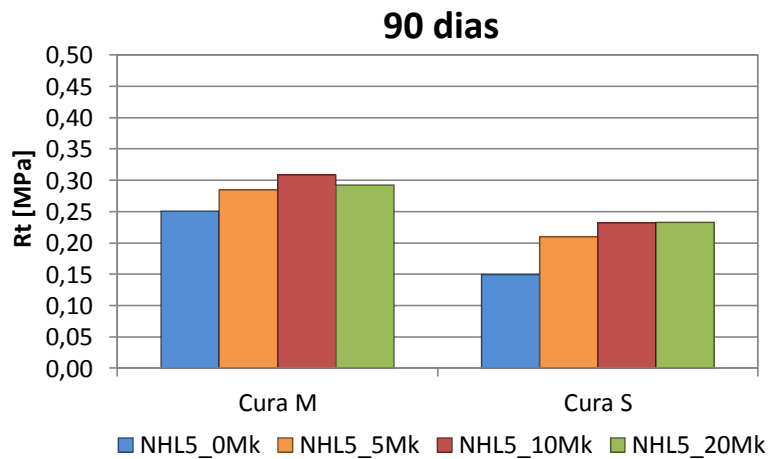


Figura 4.7 - Resistência à tração por flexão em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 90 dias.

Analisando a Figura 4.7 é possível observar em ambas as curas, que a percentagem de 10% de metacaulino em substituição parcial de massa de cal é a que apresenta novamente os maiores valores de E_d aos 90 dias. Tanto na cura marítima como na standard, registou-se uma evolução crescente do valor de resistência à tração por flexão de acordo com a percentagem de metacaulino, até à argamassa NHL5_10Mk. Na cura marítima, a argamassa NHL5_20Mk apresenta um decréscimo de R_t para valores idênticos aos obtidos na NHL5_5Mk, enquanto na cura standard a argamassa com 20% de Mk apresenta valores semelhantes aos obtidos com 10% de Mk.

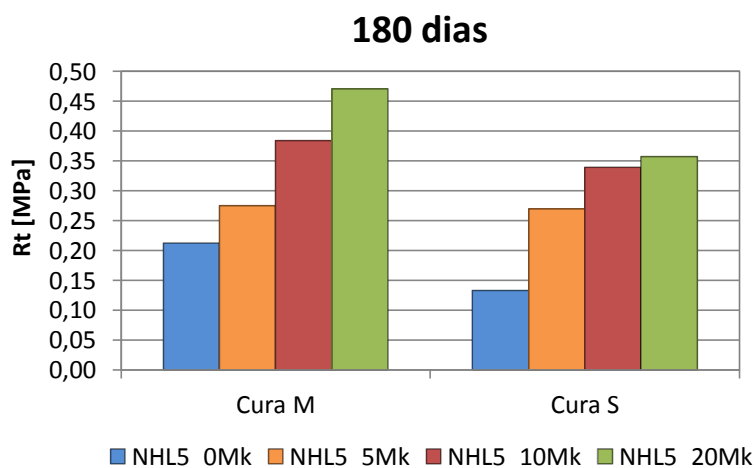


Figura 4.8 - Resistência à tração por flexão em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 180 dias.

Aos 180 dias verifica-se pela primeira vez que a argamassa com 20% de metacaulino em substituição parcial de massa de cal é a que apresenta, para as duas curas, os maiores valores de R_t . A Figura 4.8 permite verificar que existe uma relação proporcional entre o teor de metacaulino e a resistência à tração por flexão, na medida em que o aumento da percentagem de Mk nas argamassas proporciona maiores valores de R_t . Esta crescente evolução dos valores de R_t , de acordo com a percentagem de metacaulino, é menos acentuada para a cura standard, que apresenta valores semelhantes para as argamassas com 10% e 20% de metacaulino.

4.3.3. Resistência à compressão

No Quadro 4.4 são apresentados os valores médios e desvio padrão da resistência à compressão, R_c , para todas as argamassas e respectiva condição de cura nas várias idades de caracterização.

Os valores de resistência à compressão obtidos para cada provete de argamassa podem ser consultados em anexo (Anexo 6).

Quadro 4.4 - Valores médios e desvios padrão da resistência à tracção por flexão

Argamassa	Rc [MPa]					
	28 dias		90 dias		180 dias	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
NHL5_0Mk_M	0,65	0,20	0,60	0,05	0,37	0,13
NHL5_0Mk_S	0,40	0,03	0,35	0,04	0,21	0,09
NHL5_5Mk_M	1,20	0,22	0,96	0,03	0,56	0,10
NHL5_5Mk_S	0,82	0,24	0,82	0,06	0,49	0,20
NHL5_10Mk_M	1,82	0,44	0,92	0,31	0,57	0,08
NHL5_10Mk_S	1,55	0,43	1,24	0,24	0,46	0,21
NHL5_20Mk_M	1,41	0,12	0,91	0,32	0,52	0,18
NHL5_20Mk_S	1,09	0,15	0,67	0,08	0,53	0,27

De modo a facilitar a análise e comparação dos resultados de Rc, a Figura 4.9 mostra graficamente a evolução da resistência à compressão das diferentes argamassas e respectiva condição de cura, com a idade.

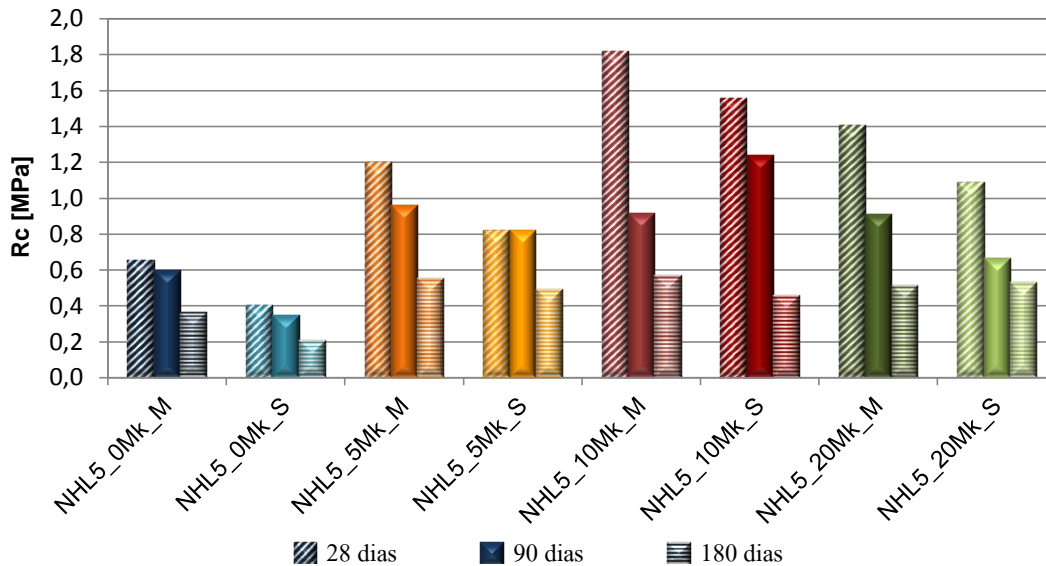


Figura 4.9 - Resistência à compressão das argamassas aos 28, 90 e 180

Analisando este gráfico é possível identificar um padrão de valores de Rc decrescente com a idade para cada argamassa e respectiva cura. Aos 28 dias registam-se os maiores valores de Rc, todavia aos 90 dias existe uma diminuição de valores, bastante acentuada nas argamassas com 10% e 20% de metacaulino, à excepção da argamassa NHL5_5Mk_S que não registou qualquer alteração. Aos 180 dias todas as argamassas diminuíram de valores comparativamente com os 90 dias. As argamassas sujeitas a uma cura marítima apresentam valores de Rc

superiores aos das argamassas idênticas sujeitas a uma cura standard, à exceção da NHL5_10Mk aos 90 dias e da NHL5_20Mk aos 180 dias.

Para comprovar a influência do teor de metacaulino em cada condição de cura com a idade, apresentam-se nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 os valores de Rc obtidos para cada argamassa ensaiada.

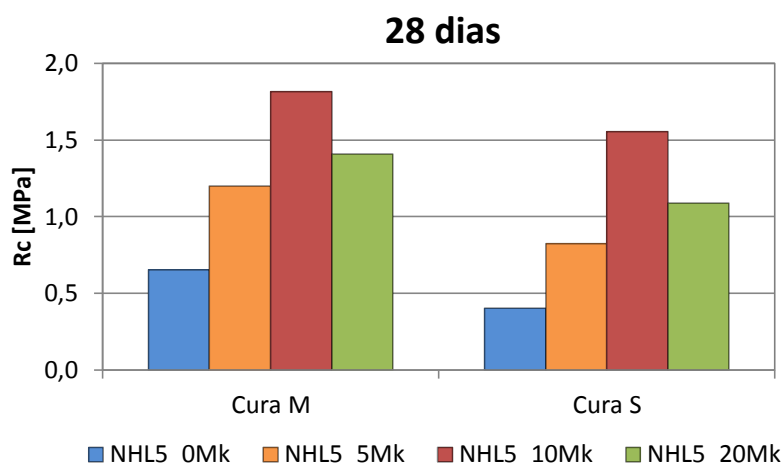


Figura 4.10- Resistência à compressão em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 28 dias.

Aos 28 dias verifica-se que os valores de resistência à compressão mais elevados em ambas as curas correspondem à argamassa NHL5_10Mk. Graficamente (Figura 4.10), verifica-se para ambas as curas uma evolução do valor de Rt crescente com o aumento de metacaulino até à argamassa NHL5_10Mk. Porém, para a argamassa NHL5_20Mk, regista-se uma diminuição de valor comparativamente com a argamassa NHL5_10Mk, embora superior em relação à argamassa de referência, sem metacaulino.

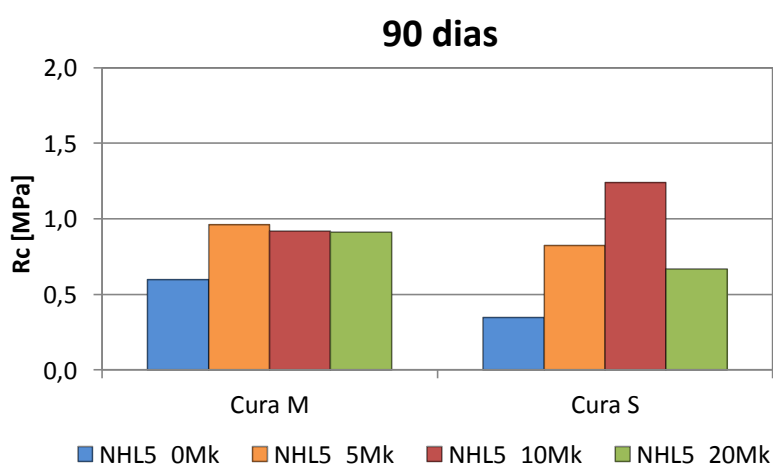


Figura 4.11 - Resistência à compressão em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 90 dias.

Pela análise da Figura 4.11 prova-se, para a cura marítima, que as argamassas com teores de substituição de metacaulino apresentam valores semelhantes entre si e superiores à argamassa de referência - sem metacaulino. Para a cura standard, constata-se que a crescente presença de metacaulino provocou um aumento da R_c , atingindo o máximo para a argamassa com 10% de Mk. Na argamassa com 20% de Mk verifica-se um decréscimo de valor em relação à NHL5_10Mk, mas superior à argamassa sem metacaulino.

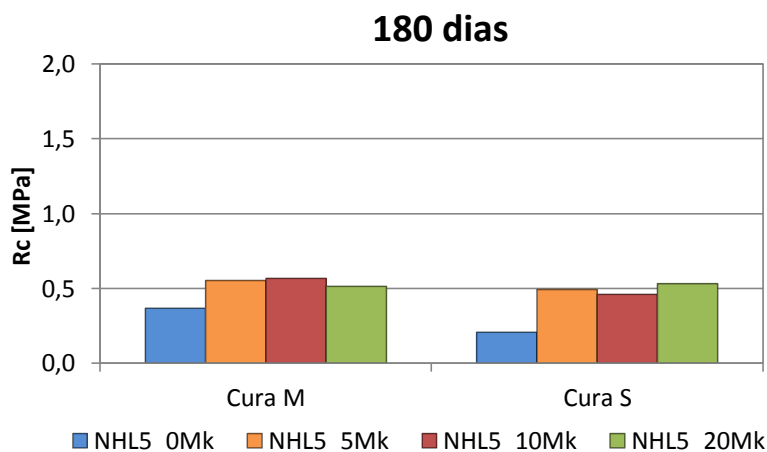


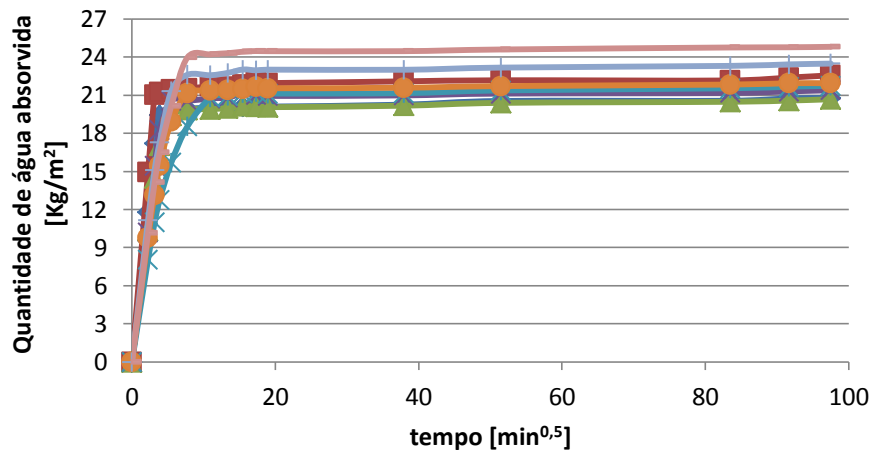
Figura 4.12 - Resistência à compressão em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 180 dias.

De acordo com a Figura 4.12 atesta-se, para ambas as curas, que as argamassas com metacaulino apresentam valores de resistência à compressão superiores aos obtidos para a argamassa sem Mk. Observa-se de igual forma que as argamassas com 5%, 10% e 20% de teores de substituição de metacaulino apresentam valores idênticos para ambas as curas, embora não se verifique um padrão definido de evolução dos valores de R_c com o aumento de Mk.

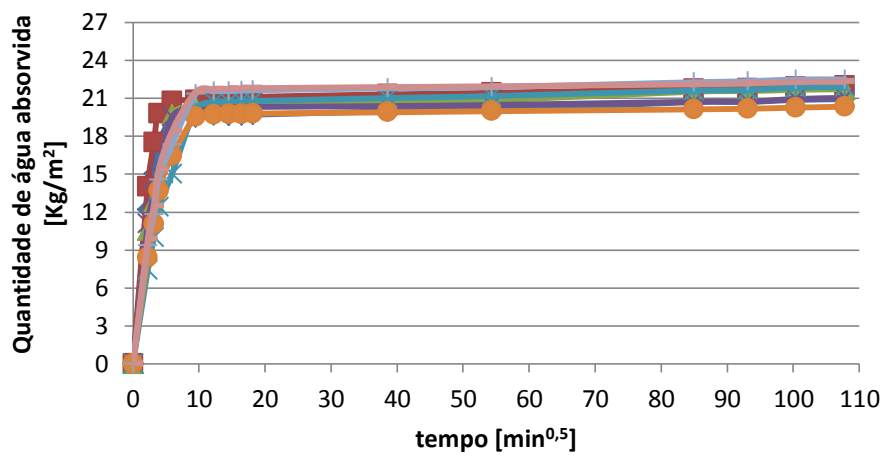
4.3.4. Absorção de água por capilaridade

Para avaliar o comportamento das argamassas face à água realizou-se o ensaio de absorção de água por capilaridade. Com este ensaio foi possível traçar as curvas de absorção capilar que permitem avaliar a quantidade total de água absorvida pela argamassa, dada pelo valor assintótico (VA), bem como a rapidez com que se sucede, dado pelo coeficiente de capilaridade (CC) – declive inicial da curva de absorção de água. Quanto menor a quantidade total de água absorvida e quanto mais reduzida for a velocidade de absorção de água, melhor o comportamento da argamassa face à acção da água.

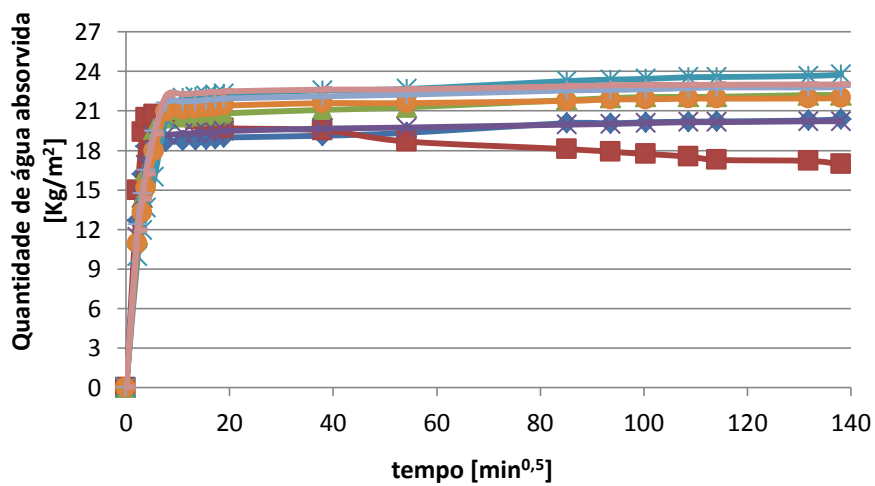
Na figura 4.13 é possível observar a evolução das curvas de absorção capilar de cada argamassa coma a idade. No Quadro 4.5 são apresentados os valores médios e desvio padrão do valor assintótico (VA) e do coeficiente de capilaridade (CC) para cada argamassa e respectiva condição de cura nas várias idades de caracterização.



28 dias



90 dias



180 dias

Figura 4.13 - Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28, 90 e 180 dias

Quadro 4.5 - Valores médios e desvios padrão do valor assintótico e do coeficiente de capilaridade

Argamassa	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}]	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
NHL5_0Mk_M	20,8	1,0	5,1	0,15	20,9	1,0	4,7	0,14	20,4	1,0	4,8	0,44
NHL5_0Mk_S	22,6	0,3	6,7	0,13	22,0	0,8	5,4	0,27	17,0	5,1	5,5	0,14
NHL5_5Mk_M	20,7	0,8	4,5	0,63	21,7	1,0	4,0	0,35	22,2	2,4	4,3	0,11
NHL5_5Mk_S	21,4	0,3	4,8	0,15	21,0	1,2	4,2	0,27	20,2	0,5	4,4	0,01
NHL5_10Mk_M	21,7	2,3	3,3	0,10	21,9	1,9	3,2	0,22	23,8	1,6	3,6	0,22
NHL5_10Mk_S	21,9	1,2	4,0	0,41	20,3	0,2	3,5	0,10	22,0	2,0	4,0	0,12
NHL5_20Mk_M	23,5	0,2	3,3	0,14	22,5	0,8	3,7	0,25	22,8	1,2	4,4	0,31
NHL5_20Mk_S	24,8	1,0	4,3	0,16	22,3	1,2	3,9	0,01	23,0	0,1	4,3	0,05

Para uma melhor comparação dos resultados obtidos, nas Figuras 4.14 e 4.15 apresentam-se em forma de gráfico a evolução dos valores de VA e de CC de todas argamassas e respectivas curas com a idade.

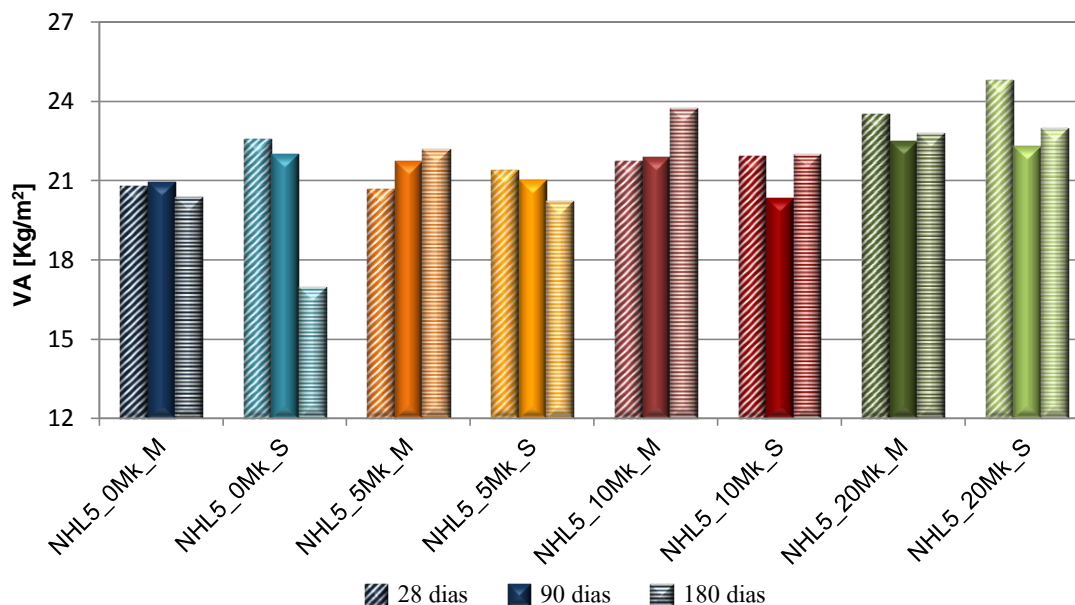


Figura 4.14 - Valor assintótico das argamassas aos 28, 90 e 180 dias

Pela análise da Figura 4.14 é possível observar que não existe um padrão definido de evolução dos valores de VA para cada argamassa e respectiva cura, ao longo das três idades. As argamassas sem metacaulino e a argamassa NHL5_5Mk_S indicam um decréscimo do valor assintótico ao longo do tempo, todavia, esta diminuição de valores não é tão evidente na argamassa NHL5_0Mk_M, que apresenta valores praticamente idênticos a todas as idades. Para as argamassa NHL5_5Mk_M e NHL5_10Mk_M verifica-se o contrário do registado anteriormente,

na medida em que ambas apresentam uma evolução do valor assintótico crescente ao longo do tempo. Nas argamassas com 20% de Mk bem como a argamassa NHL5_10Mk_S observa-se que os valores de VA aos 28 dias apresentam um valor mais elevado que o registado aos 90 dias, enquanto dos 90 para os 180 dias se regista um acréscimo de valor. Este gráfico permite também atestar que é nas argamassas com 20% de Mk que se verificam os piores resultados, já que apresentam valores assintóticos elevados, enquanto as argamassas sem metacaulino registam os melhores resultados (menores valores assintóticos).

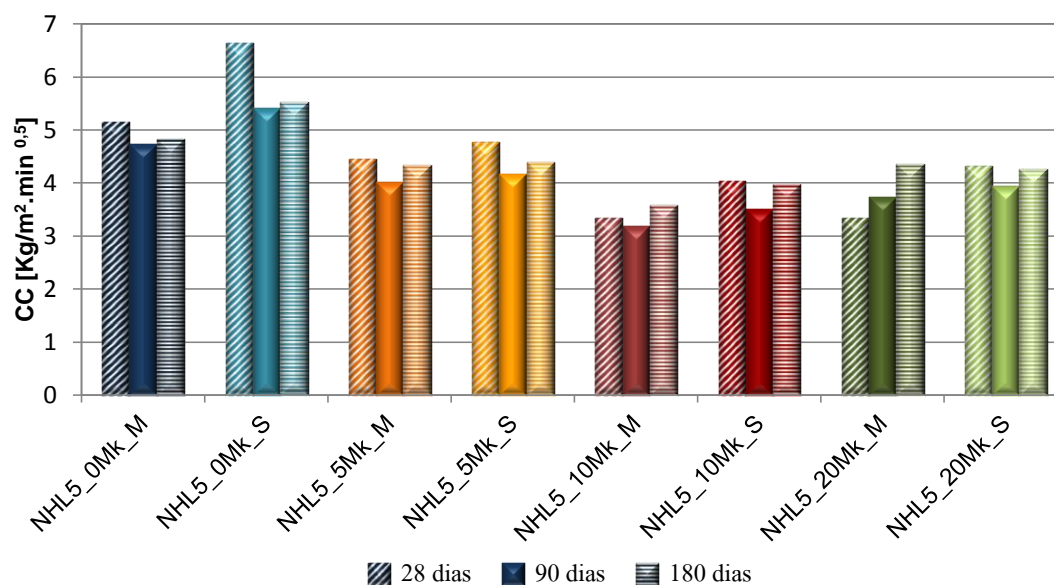


Figura 4.15 - Coeficiente de capilaridade das argamassas aos 28, 90 e 180 dias

Analisando a Figura 4.15 nota-se que aos 28 dias se registam maiores valores de CC para cada argamassa e respectiva condição de cura, que os registados aos 90 dias, sendo as argamassas sem Mk as que apresentam os valores mais elevados. Aos 180 dias assinalam-se valores muito próximos dos alcançados aos 28 dias, à exceção da argamassa sem Mk sujeita a uma cura standard que apresenta valores inferiores. Relativamente à influência do tipo de cura, a mesma argamassa sujeita aos dois tipos de cura apresenta resultados de CC quase sempre inferiores ou bastante semelhantes para a cura marítima.

De acordo com as Figuras 4.16 e 4.17 e 4.18 é possível observar a evolução valores de VA para cada argamassa, de forma a analisar a influência do teor de metacaulino em cada condição de cura, ao longo das três idades.

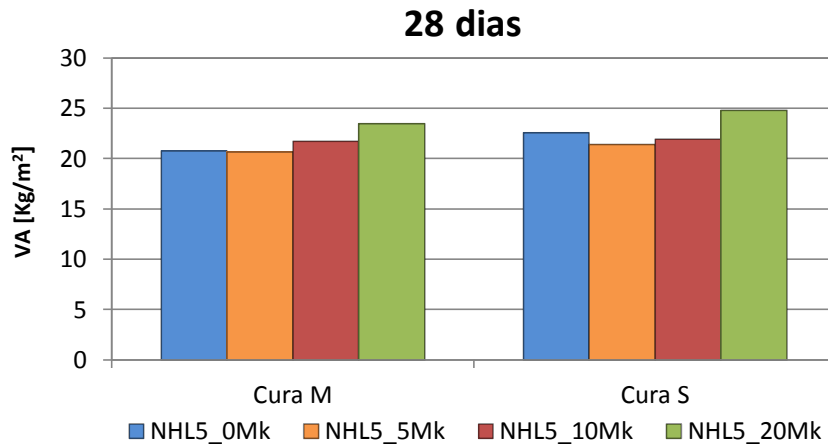


Figura 4.16 - Valor assintótico em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 28 dias.

Através do andamento das curvas de absorção capilar aos 28 dias e da Figura 4.16 observa-se que todas as argamassas apresentam valores de absorção de água semelhantes, registando-se um ligeiro aumento de VA com o aumento da percentagem de Mk. Através do gráfico de barras verifica-se que os valores de VA são idênticos em ambas as curas, contudo os valores da cura standard são ligeiramente superiores aos registados para a cura marítima.

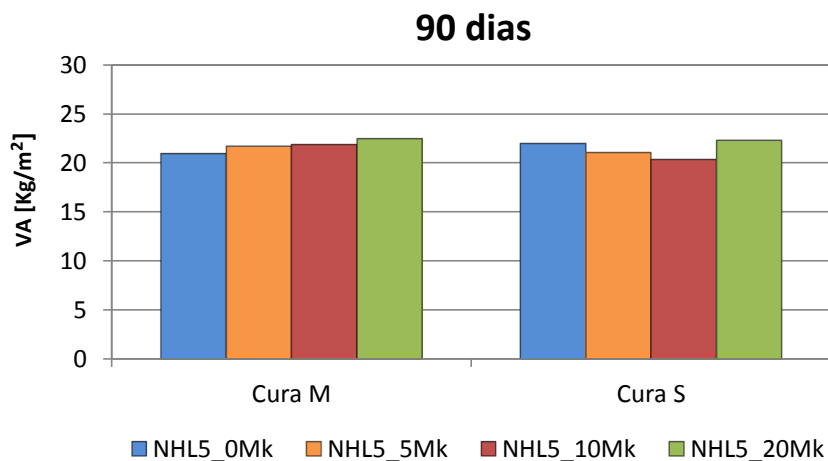


Figura 4.17 - Valor assintótico em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 90 dias.

Aos 90 dias todas as argamassas apresentam novamente valores assintóticos semelhantes, registando-se um ligeiro aumento de VA com o aumento da percentagem de Mk para as argamassas sujeitas a uma cura Marítima, enquanto as argamassas sujeitas a uma cura standard apresentam uma pequena descida de VA com o aumento de Mk, excepto a NHL5_20Mk que regista valores idênticos aos da argamassa sem Mk.

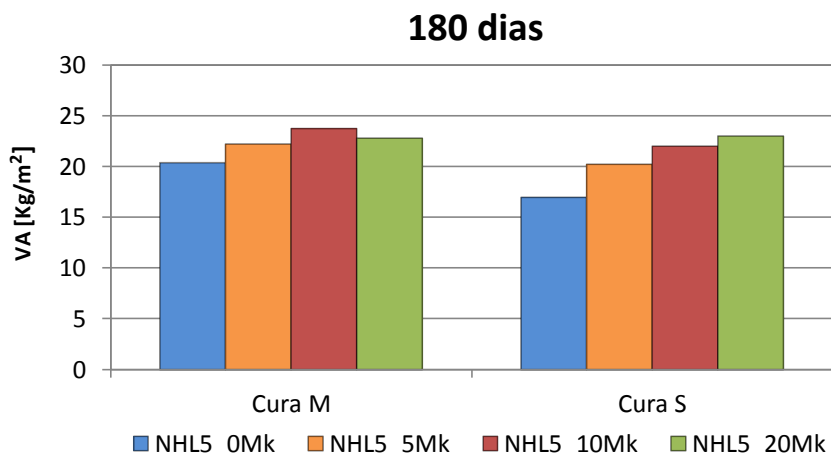


Figura 4.18 - Valor assintótico em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 180 dias.

O desempenho das argamassas aos 180 dias é semelhante ao ocorrido nas restantes idades, na medida em que possuem valores de absorção de água semelhantes, à exceção da argamassa NHL5_0Mk_S que regista um comportamento incomum, devido à perda de massa corrida durante a realização do ensaio. Verifica-se em ambas as curas, que todas as argamassas mostram um ligeiro aumento de VA com o aumento da percentagem de Mk, à exceção da argamassa NHL5_20Mk_M.

De acordo com a Figura 4.19 apresenta-se a evolução do troço inicial das curvas de absorção capilar, enquanto a Figura 4.20 regista os valores de CC para cada argamassa de forma a analisar a influência do teor de metacaulino em cada condição de cura, ao longo das três idades.

Através da Figura 4.20 denota-se em todas as idades um padrão semelhante de evolução do valor de CC de acordo com a percentagem de metacaulino para argamassas idênticas sujeitas a condições de cura diferentes. Manifesta-se uma evolução do CC decrescente com o aumento do teor de metacaulino até à argamassa NHL5_10Mk, porém, para a argamassa NHL5_20Mk regista-se um ligeiro aumento de valor comparativamente com a argamassa NHL5_10Mk. Os melhores resultados foram obtidos pelas argamassas com 10% de Mk que apresentaram os valores mais baixos de CC, enquanto os piores resultados foram obtidos para as argamassas sem Mk que registaram os valores mais elevados.

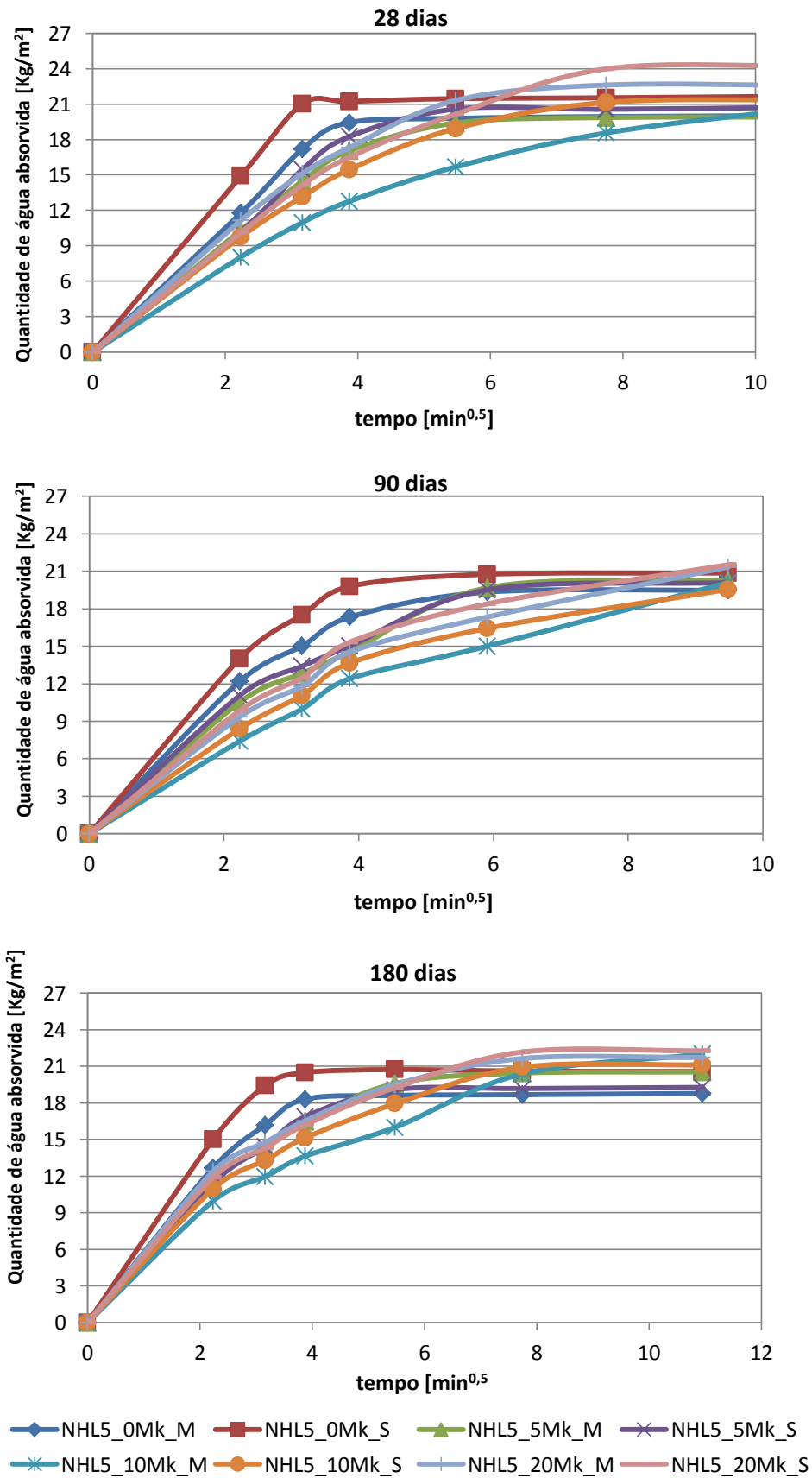


Figura 4.19 - Fase inicial das curvas absorção de água por capilaridade aos 28, 90 e 180 dias

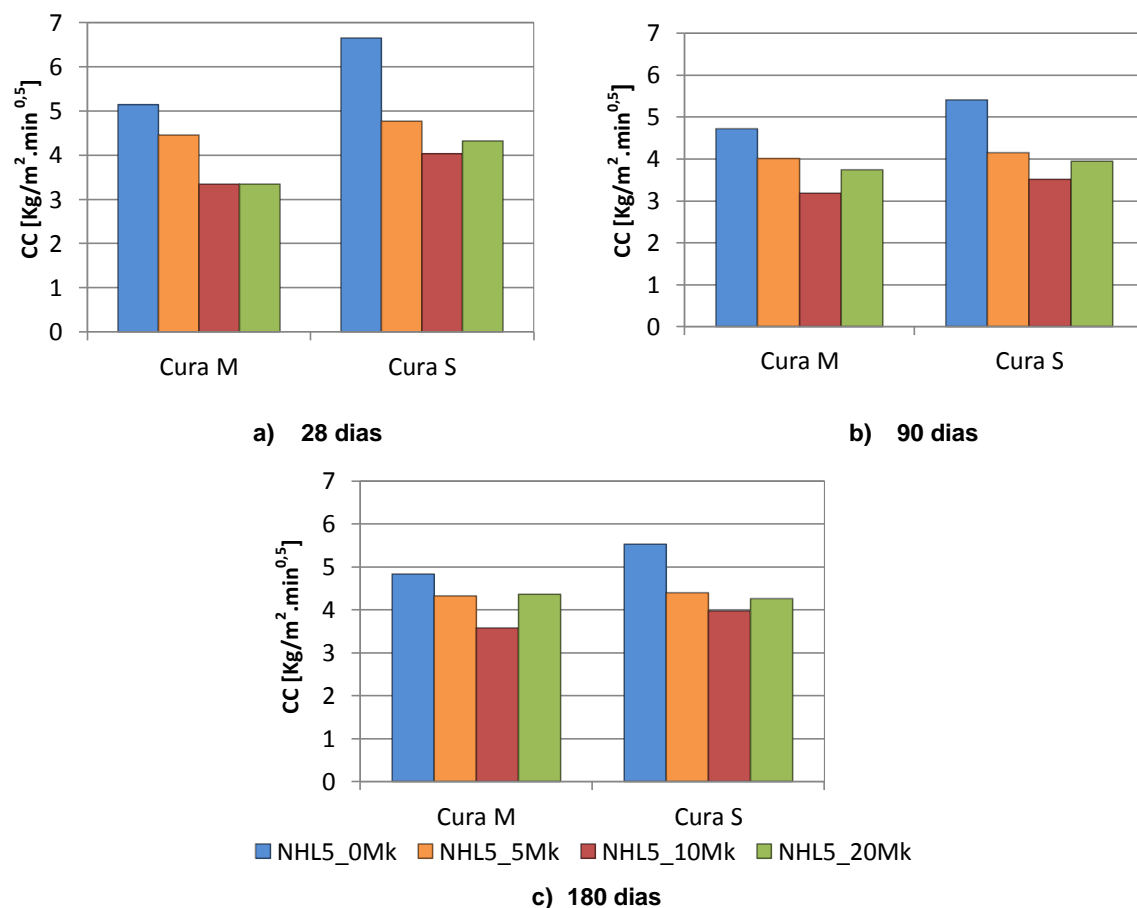
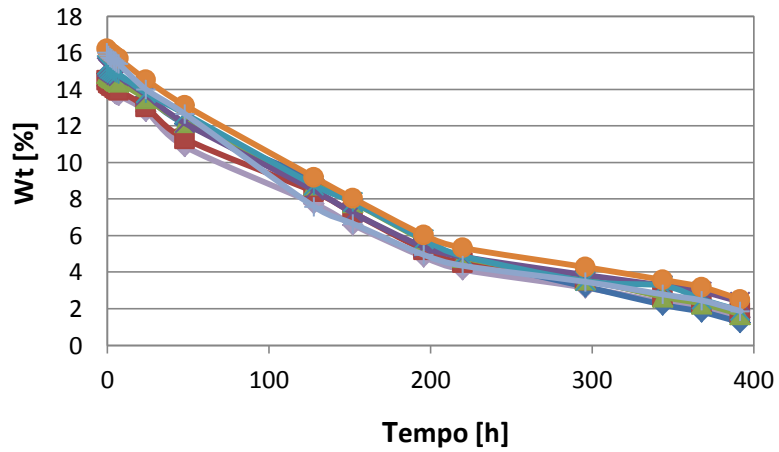


Figura 4.20 - Coeficiente de capilaridade em cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino

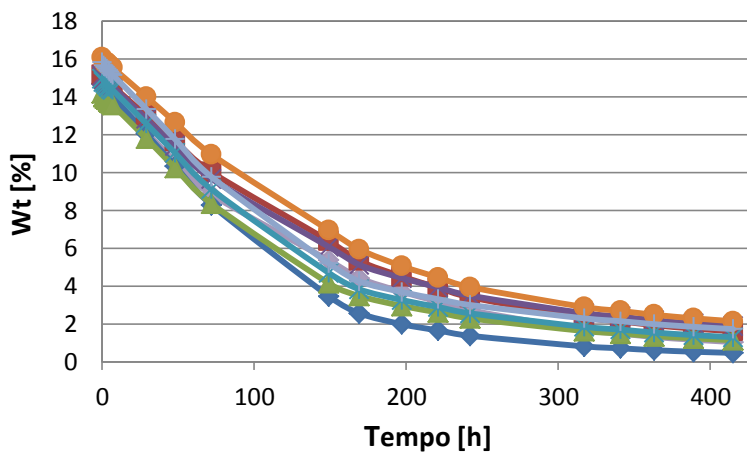
4.3.5. Secagem

Para avaliar as condições de secagem das argamassas realizou-se o ensaio de secagem. Com este, foi possível obter a curva de secagem em função do tempo para cada argamassa e respectiva cura, através das quais se determinou o índice de secagem, IS, que traduz a evolução da secagem; a taxa de secagem, TS, obtida através do declive inicial da curva de secagem, que revela a velocidade inicial de secagem. As argamassas mais favoráveis são aquelas que apresentam maior facilidade de secagem (menores valores de IS) e uma velocidade inicial de secagem elevada (maiores valores de TS). Os provetes das argamassas sem Mk sujeitas a uma cura standard foram perdendo massa durante a realização deste ensaio aos 180 dias.

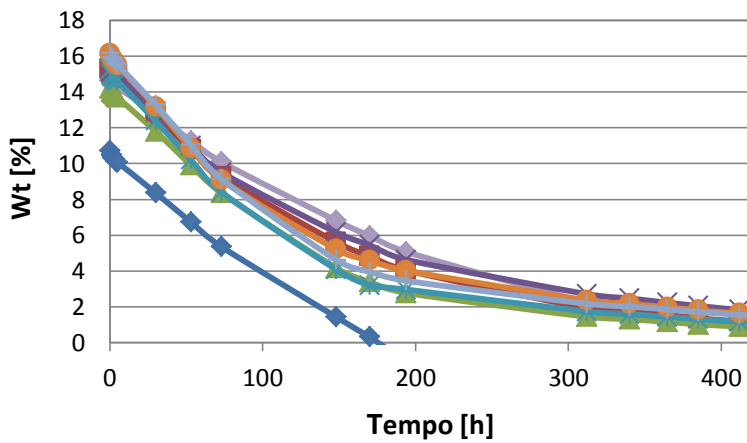
Na figura 4.21 é possível observar a evolução das curvas de absorção capilar de cada argamassa com a idade. No Quadro 4.6 são apresentados os valores médios e desvio padrão da taxa de secagem (TS) e do índice de secagem (IS) para cada argamassa e respectiva condição de cura às três idades.



a)



b)



◆ NHL5_0Mk_M ◆ NHL5_0Mk_S ◆ NHL5_5Mk_M ◆ NHL5_5Mk_S
 ◆ NHL5_10Mk_M ◆ NHL5_10Mk_S ◆ NHL5_20Mk_M ◆ NHL5_20Mk_S

c)

Figura 4.21 - Curvas de secagem das argamassas aos a) 28, b) 90 e c) 180 dias

Quadro 4.6 - Valores médios e desvios padrão da taxa de secagem e do índice de secagem

Argamassa	28 dias				90 dias				180 dias			
	TS [Kg(m ² .h)]		IS [-]		TS [Kg(m ² .h)]		IS [-]		TS [Kg(m ² .h)]		IS [-]	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
NHL5_0Mk_M	0,067	0,01	0,43	0,04	0,084	0,01	0,33	0,02	0,062	0,00	0,31	0,01
NHL5_0Mk_S	0,056	0,00	0,45	0,01	0,089	0,01	0,27	0,02	0,072	0,01	–	–
NHL5_5Mk_M	0,064	0,01	0,45	0,04	0,071	0,01	0,38	0,05	0,084	0,01	0,27	0,02
NHL5_5Mk_S	0,055	0,01	0,46	0,02	0,080	0,01	0,32	0,02	0,079	0,01	0,24	0,01
NHL5_10Mk_M	0,063	0,01	0,45	0,03	0,077	0,02	0,38	0,06	0,084	0,01	0,30	0,04
NHL5_10Mk_S	0,055	0,00	0,46	0,03	0,081	0,01	0,33	0,02	0,092	0,01	0,24	0,02
NHL5_20Mk_M	0,064	0,00	0,46	0,00	0,070	0,01	0,40	0,01	0,098	0,02	0,27	0,05
NHL5_20Mk_S	0,070	0,01	0,41	0,04	0,083	0,01	0,34	0,03	0,094	0,01	0,26	0,02

Para uma melhor comparação dos resultados obtidos, nas Figuras 4.22 e 4.23 apresentam-se em forma de gráficos a evolução dos valores da TS e do IS de todas argamassas e respectivas curas com a idade.

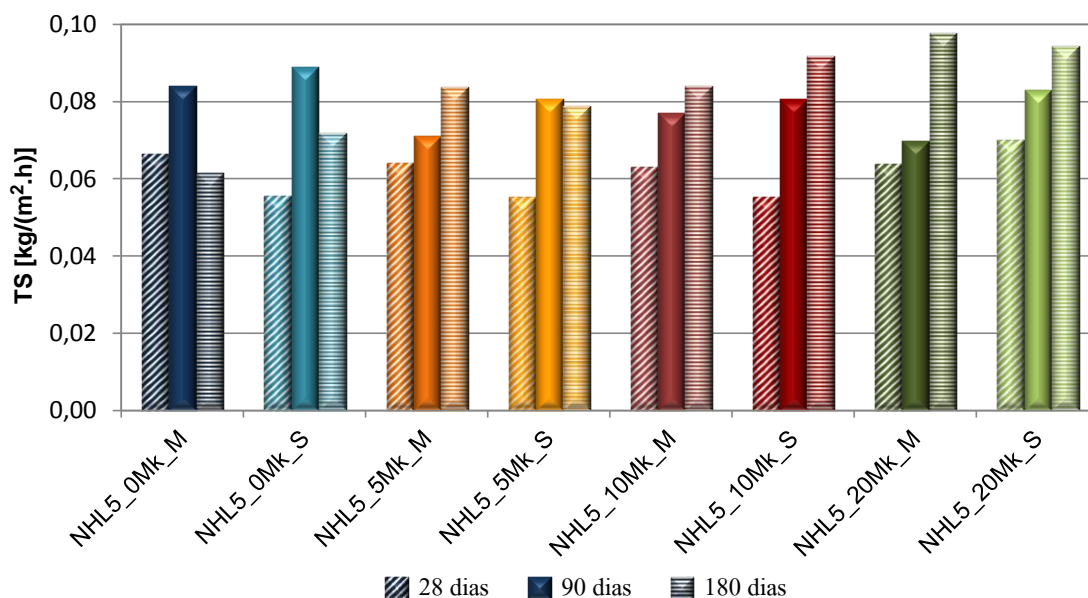


Figura 4.22 - Taxa de secagem das argamassas aos 28, 90 e 180 dia

Analisando o gráfico da Figura 4.22, é evidente um padrão de valores de TS crescente com a idade para cada argamassa e respectiva condição de cura, à excepção das argamassas sem Mk que apresentam os maiores valores de TS aos 90 dias. Observa-se que aos 28 dias as argamassas com Mk apresentam o menor valor de TS, enquanto aos 90 e 180 dias verifica-se um acréscimo de TS, atingindo o valor máximo aos 180 dias. Todas as argamassas exibem valores semelhantes de TS, contudo as argamassas NHL5_20Mk e NHL5_0Mk são as que revelam os valores mais elevados em todas as idades.

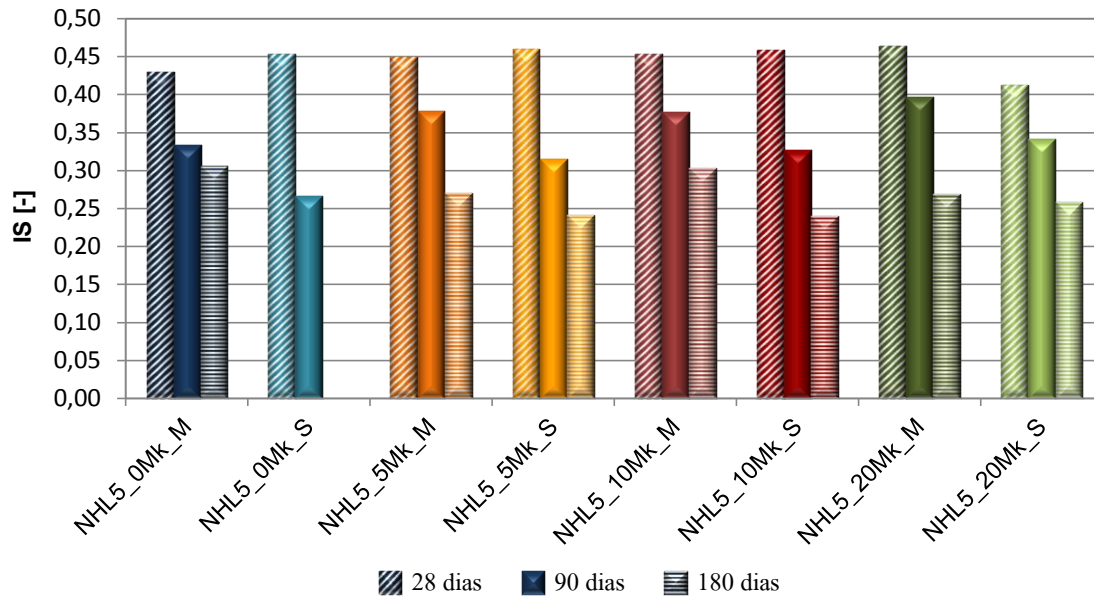


Figura 4.23- Índice de secagem das argamassas aos 28, 90 e 180 dias

De acordo com a Figura 4.23 constata-se o inverso do sucedido para a TS, já que se verifica um padrão de valores de IS decrescente com a idade para cada argamassa e condição de cura. Aos 28 dias registam-se os valores mais elevados de IS, enquanto aos 90 e 180 dias existe uma progressiva diminuição desses valores, assinalando-se aos 180 dias os mais baixos. Aos 28 dias todas as argamassas apresentam valores de IS semelhantes em ambas as curas, enquanto aos 90 e 180 dias as argamassas sujeitas a uma cura marítima mostram valores de IS superiores aos registados para argamassas idênticas sujeitas a uma cura standard.

Na Figura 4.24 apresentam-se os valores de IS e TS para cada argamassa, de forma a analisar a influência do teor de metacaulino em cada condição de cura ao longo da idade.

Aos 28 dias verifica-se que as argamassas sujeitas a uma cura marítima apresentam um ligeiro aumento de IS com o aumento da percentagem de Mk, enquanto as argamassas submetidas a uma cura standard apresentam valores de IS semelhantes, à excepção da argamassa NHL5_20Mk que regista valores inferiores. Relativamente aos valores de TS, constata-se que as argamassas sujeitas a cura marítima com adições de metacaulino registaram valores semelhantes entre si e ligeiramente inferiores aos registados para a argamassa sem Mk. As argamassas submetidas a uma cura standard apresentam valores de TS semelhantes, excepto a argamassa NHL5_20Mk que regista valores bastante superiores.

Aos 90 dias, observa-se para ambas as condições de cura uma evolução crescente de IS com o aumento do teor em metacaulino das argamassas, registando-se o valor máximo para as argamassas com 20% de Mk. Os valores de TS mais elevados em ambas as curas correspondem à argamassa sem Mk, registando-se uma diminuição de valor para as argamassas com

metacaulino. As argamassas com adições de Mk apresentam valores idênticos entre si, no entanto a argamassa NHL5_10Mk sujeita a cura marítima regista um valor superior.

Aos 180 dias verifica-se que as argamassas submetidas a cura marítima apresentam uma diminuição de IS nas argamassas com metacaulino, no entanto a argamassa com 10% de Mk apresenta um valor idêntico à argamassa de referência. Na cura standard constata-se que as argamassas com menores teores em Mk apresentam valores de IS semelhantes, contudo o maior valor alcançado foi na argamassa NHL5_20Mk. Os valores de TS apresentam em ambas as curas um padrão de evolução crescente com o aumento do teor em metacaulino, registando-se o valor máximo nas argamassas NHL_20Mk.

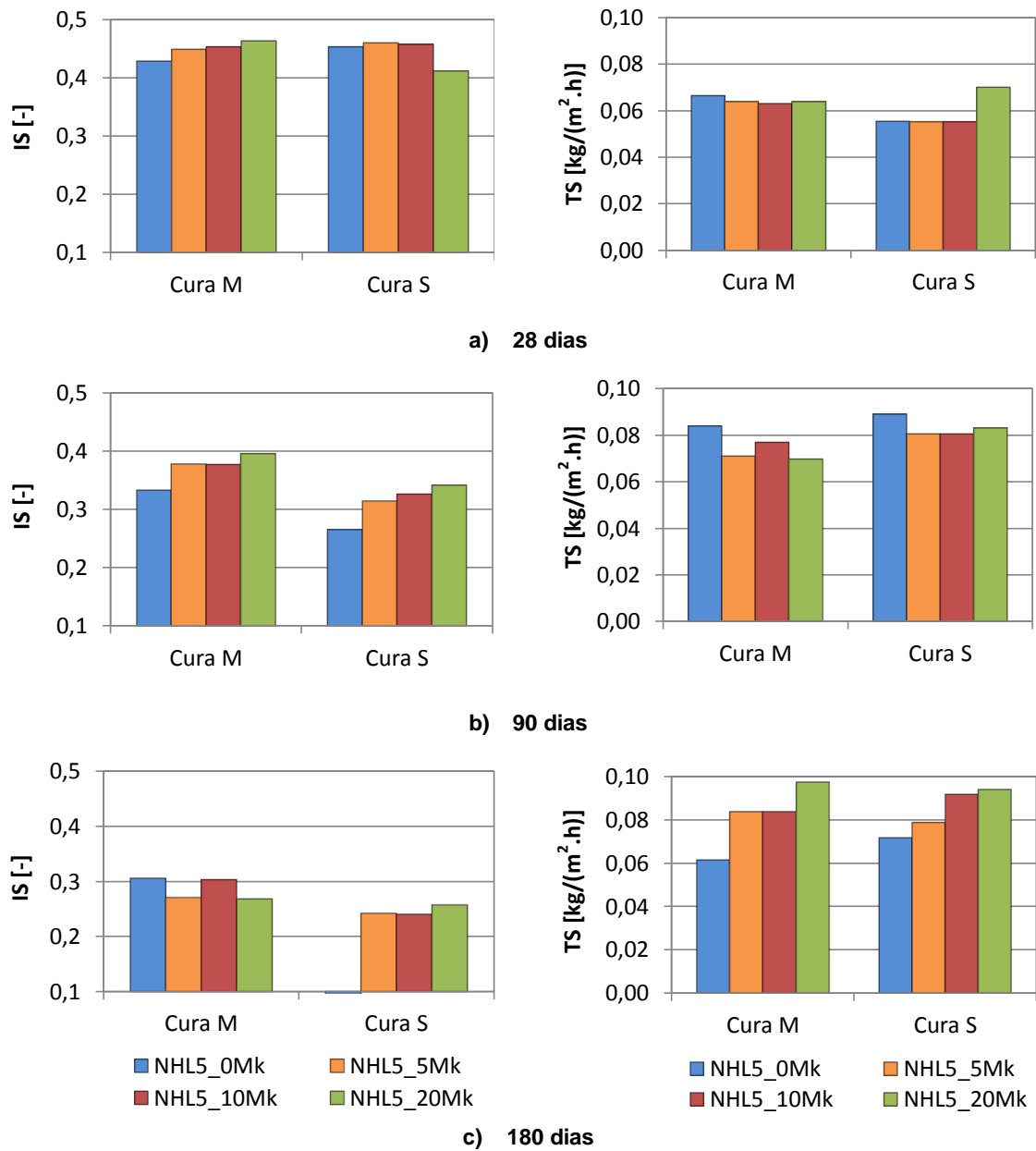


Figura 4.24 - índice de Secagem e Taxa de secagem para cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 28, 90 e 180 dias

4.3.6. Porosidade aberta e massa volúmica aparente

No quadro 4.7 apresentam-se os resultados de porosidade aberta (Pab) e massa volúmica aparente (MVA) para todas as argamassas e respectiva condição de cura, nas várias idades de caracterização.

Devido à elevada degradação das amostras resultante dos ensaios aos 90 e 180 dias, não foi possível registar massa nem obter resultados para a argamassa sem metacaulino, sujeita a uma cura de referência standard (Figura 4.25).



Figura 4.25 - Degradação da argamassa NHL5_0Mk_S durante o ensaio de porosidade aberta aos 90 dias

Os valores de porosidade aberta e massa volúmica aparente obtidos para cada provete de argamassa podem ser consultados em anexo (Anexo 6).

Quadro 4.7 - Valores médios e desvios padrão da porosidade aberta e da massa volúmica aparente

Argamassa	28 dias				90 dias				180 dias			
	MVA [kg/m ³]		Pab [%]		MVA [kg/m ³]		Pab [%]		MVA [kg/m ³]		Pab [%]	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
NHL5_0Mk_M	1636	108	27,8	4,1	1858	13	19,5	0,3	1876	9	18,1	0,9
NHL5_0Mk_S	1627	4	28,6	0,3	—	—	—	—	—	—	—	—
NHL5_5Mk_M	1683	26	24,8	1,1	1843	6	21,2	0,2	1892	36	19,1	1,9
NHL5_5Mk_S	1680	13	25,5	0,9	1866	5	19,8	0,4	1886	6	19,3	0,2
NHL5_10Mk_M	1679	39	25,7	1,1	1849	7	21,0	0,4	1850	9	20,7	0,2
NHL5_10Mk_S	1687	10	25,3	0,0	1854	9	19,6	2,0	1850	10	20,5	0,2
NHL5_20Mk_M	1722	24	23,6	1,4	1822	3	21,0	0,2	1819	27	21,3	0,8
NHL5_20Mk_S	1707	14	23,7	0,9	1836	7	21,0	0,4	1807	13	21,6	0,8

Para facilitar a análise e comparação dos resultados apresenta-se graficamente nas Figuras 4.26 e 4.27, o valor da porosidade aberta e da massa volúmica aparente das diferentes argamassas e respectiva condição de cura, ao longo do tempo (28, 90 e 180 dias).

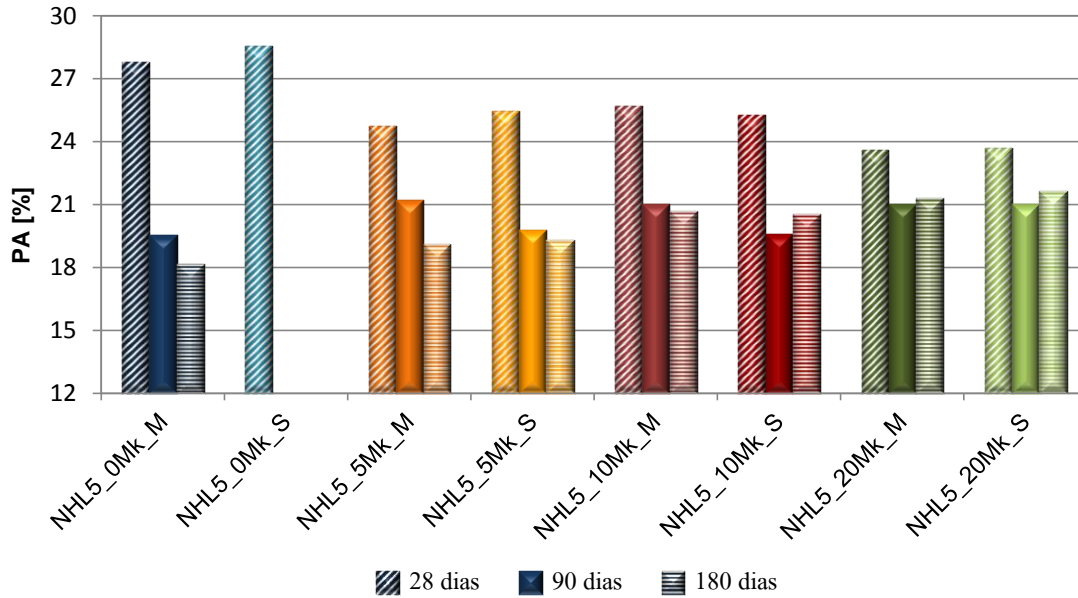


Figura 4.26 - Porosidade aberta das argamassas aos 28, 90 e 180 dias

Examinando a Figura 4.26 é possível observar que aos 28 dias se registam os maiores valores de Pab para cada argamassa e respectiva condição de cura, sendo as argamassas sem Mk as que apresentam os valores mais elevados. Aos 90 dias verifica-se um decréscimo de valor de porosidade aberta em todas as argamassas, enquanto aos 180 dias se assinalam valores muito próximos dos alcançados aos 90 dias. Relativamente à influência do tipo de cura, não é possível constatar qual a mais benéfica, na medida em que a mesma argamassa sujeita aos dois tipos de cura apresenta resultados de Pab semelhantes.

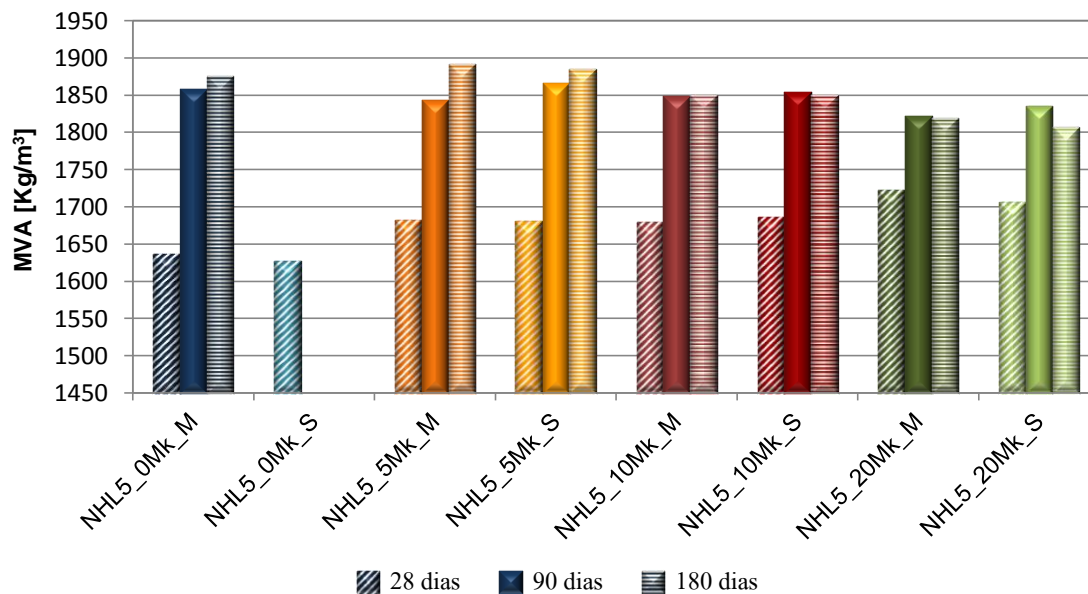


Figura 4.27 - Massa volúmica aparente das argamassas aos 28, 90 e 180 dias

De acordo com a Figura 4.27 constata-se o inverso do ocorrido para a Pab. Para todas as argamassas e respectiva cura, regista-se um aumento significativo do valor da massa volúmica aparente dos 28 para os 90 dias, contudo, aos 180 dias os valores são muito próximos dos alcançados aos 90 dias. Aos 28 dias, o aumento da percentagem de metacaulino traduz-se num aumento dos valores de MVA, enquanto aos 90 e 180 dias sucede o contrário, ou seja, o aumento da percentagem de metacaulino traduz-se numa diminuição dos valores de MVA. Não é possível avaliar qual o tipo de cura mais benéfico na medida em que argamassas idênticas sujeitas a curas diferentes, apresentam resultados de Pab semelhantes.

Na Figura 4.28 apresenta-se a evolução dos valores obtidos de Pab e MAV para cada argamassa, de modo a analisar a influência do teor de metacaulino, em cada condição de cura, ao longo das três idades.

Aos 28 dias, verifica-se que os valores de porosidade aberta mais elevados em ambas as curas correspondem à argamassa sem Mk, registando-se uma diminuição do valor de Pab com o aumento do teor de metacaulino. Esta progressiva diminuição de Pab não se verifica para a argamassa NHL5_10Mk, sujeita a um cura marítima, visto que se regista um ligeiro aumento de valor em relação com a argamassa NHL5_5Mk, mas inferior comparativamente à argamassa sem Mk. Relativamente aos valores MVA, sucedeu-se o contrário do registado para a Pab, já que se verifica uma evolução crescente dos valores de MVA com o aumento do teor de Mk, registando-se o valor mais elevado para as argamassas com 20% de Mk.

Aos 90 dias observa-se que as argamassas com metacaulino sujeitas a cura marítima registaram valores de Pab semelhantes entre si e superiores aos registados para a argamassa sem Mk. Na cura standard confere-se que o maior valor de Pab alcançado foi na argamassa NHL5_20Mk, apresentando as argamassas com 5% e 10% de Mk valores semelhantes, mas inferiores aos registados com 20% de Mk. Em relação aos valores de MVA verifica-se para ambas as curas uma evolução decrescente com o aumento de metacaulino, à excepção da argamassa NHL5_10Mk que, na cura Marítima, regista um aumento de valor comparativamente à argamassa NHL5_5Mk, mas inferior em relação à argamassa sem metacaulino.

Aos 180 dias verifica-se, para as duas curas, um padrão de evolução do valor de porosidade aberta crescente com o aumento de metacaulino, registando-se o valor máximo nas argamassas NHL_20Mk. Prova-se para ambas as curas que a percentagem de 5% de metacaulino em substituição parcial de massa de cal é a que apresenta os maiores valores de MVA. Em comparação com os valores de Pab aos 180 dias sucedeu-se o contrário, na medida em que se verifica uma evolução decrescente dos valores de MVA com o aumento do teor de Mk.

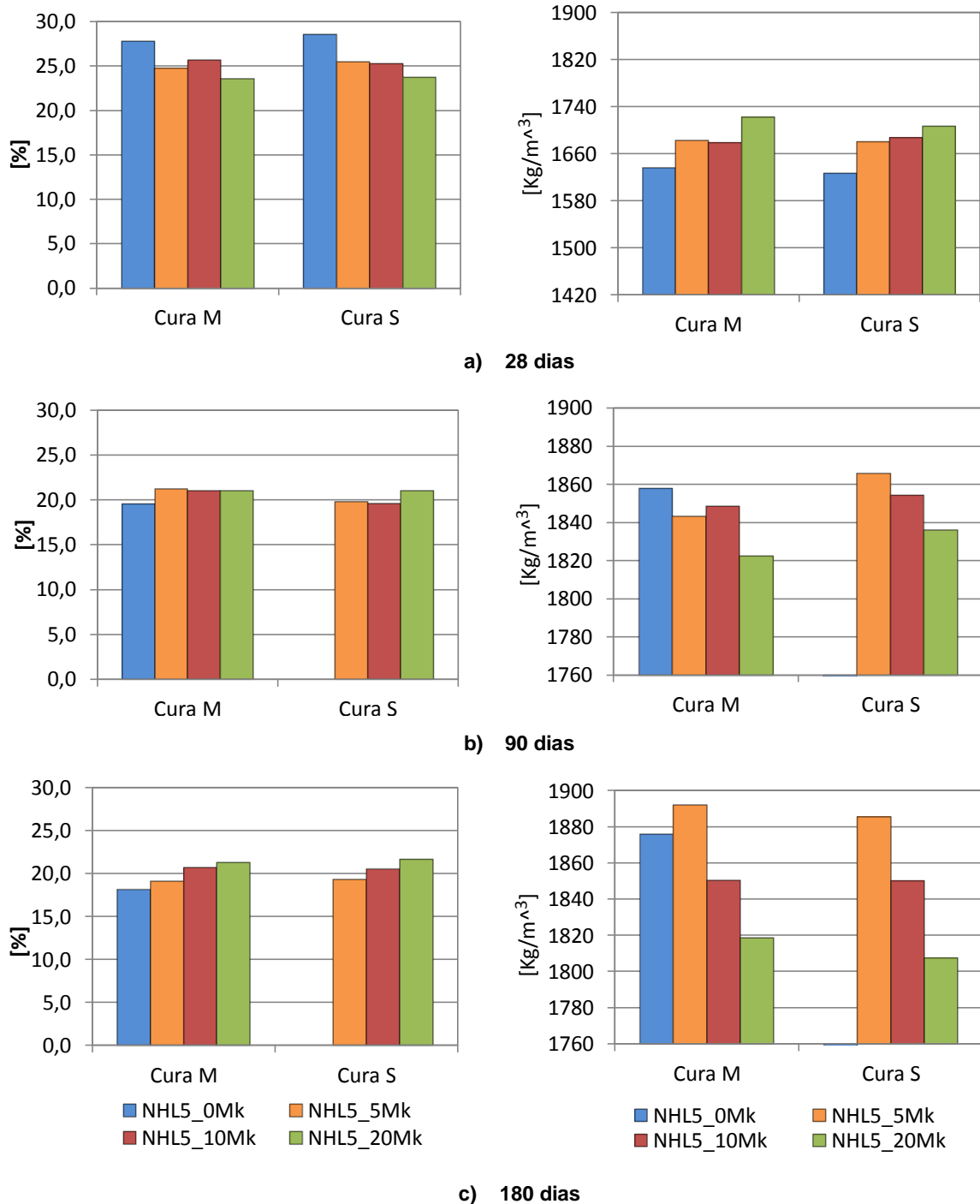


Figura 4.28 - Porosidade aberta e massa volúmica aparente para cada condição de cura, de acordo com a substituição parcial de cal por metacaulino aos 28, 90 e 180 dias

4.3.7. Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica (λ) caracteriza a maior ou menor facilidade de condução de calor por parte dos materiais. Quanto menor for o valor de λ maior a capacidade isolante do material.

Como referido em 3.9.7 não se garante precisão dos valores obtidos de λ , já que os provetes utilizados não têm as dimensões mínimas da sonda do aparelho. Contudo, considera-se possível estabelecer uma comparação entre as diferentes argamassas.

Apresentam-se no Quadro 4.8 os valores médios e desvio padrão da condutibilidade térmica de todas as argamassas e respectiva condição de cura para as várias idades de caracterização.

Quadro 4.8 - Valores médios e desvios padrão da condutibilidade térmica

Argamassa	λ [W/m.K]					
	28 dias		90 dias		180 dias	
	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P
NHL5_0Mk_M	0,683	0,017	0,633	0,062	0,731	0,101
NHL5_0Mk_S	0,612	0,040	0,559	0,016	0,669	0,025
NHL5_5Mk_M	0,709	0,062	0,668	0,075	0,748	0,020
NHL5_5Mk_S	0,646	0,013	0,684	0,057	0,703	0,033
NHL5_10Mk_M	0,758	0,067	0,682	0,040	0,702	0,036
NHL5_10Mk_S	0,638	0,036	0,651	0,042	0,683	0,030
NHL5_20Mk_M	0,598	0,048	0,592	0,108	0,659	0,048
NHL5_20Mk_S	0,578	0,047	0,574	0,036	0,602	0,034

Para uma melhor percepção e comparação dos resultados obtidos, na Figura 4.29 apresenta-se em forma de gráfico a evolução da resistência à tracção por flexão de todas as argamassas e respectivas curas com a idade.

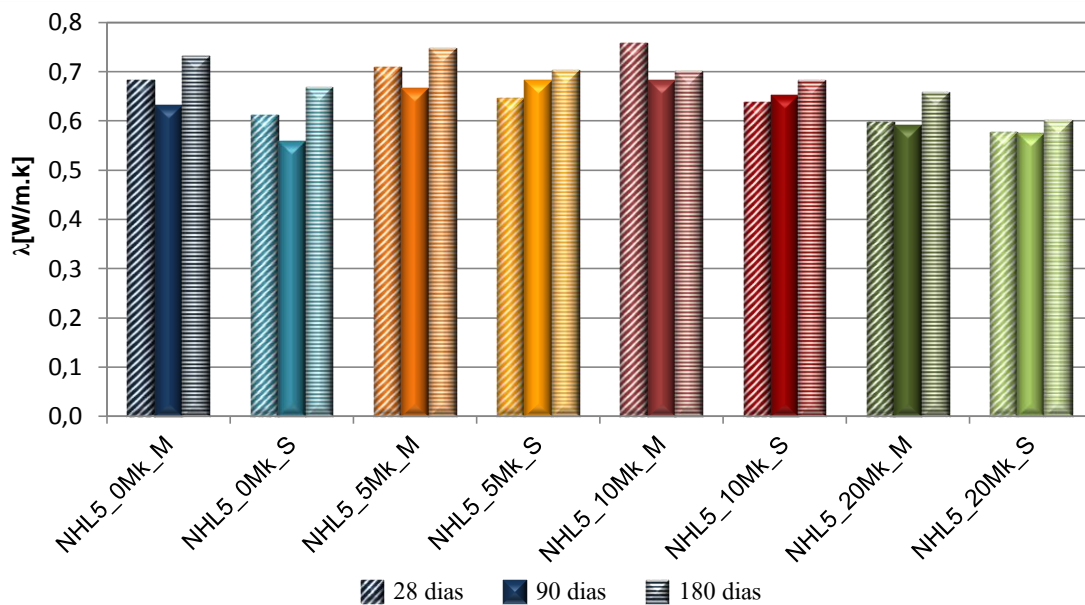


Figura 4.29 - Condutibilidade térmica das argamassas aos 28, 90 e 180 dias

Pela análise da Figura 4.29 nota-se que não existe um padrão definido de evolução dos valores de λ para cada argamassa e respectiva cura, ao longo das três idades. As argamassas sem metacaulino e a argamassa NHL5_5Mk_M apresentam aos 28 dias valores de λ superiores os registados aos 90 dias, enquanto aos 180 dias verifica-se uma subida do valor comparativamente com as outras idades. A argamassa NHL5_10Mk_M apresenta a mesma evolução com a idade das argamassas anteriores, contudo o valor de λ aos 180 dias é inferior ao registado aos 90 dias. As argamassas NHL5_5Mk_S e NHL5_10Mk_S, bem como as argamassas com 20% de metacaulino indicam um acréscimo de valor de condutibilidade térmica com a idade, embora as argamassas com 20% de Mk mostrem valores praticamente idênticos às duas primeiras idades. A Figura 4.29 permite ainda constatar que as argamassas sujeitas a uma cura marítima apresentam valores de λ superiores aos das argamassas idênticas sujeitas a uma cura standard, à excepção da NHL5_5Mk, aos 90 dias, que apresenta o maior valor para a cura standard.

4.3.8. Resistência aos sulfatos

Através do ensaio de resistência aos sulfatos foi possível registar a variação de massa das diversas argamassas após cada ciclo de imersão, secagem, pesagem. A evolução do ensaio de resistência aos sulfatos para cada argamassa e respectiva condição de cura aos 28, 90 e 180 dias é apresentada nas Figuras 4.30, 4.31 e 4.32 respectivamente.

Os valores de variação de massa obtidos para cada provete de argamassa podem ser consultados em anexo (Anexo 6).

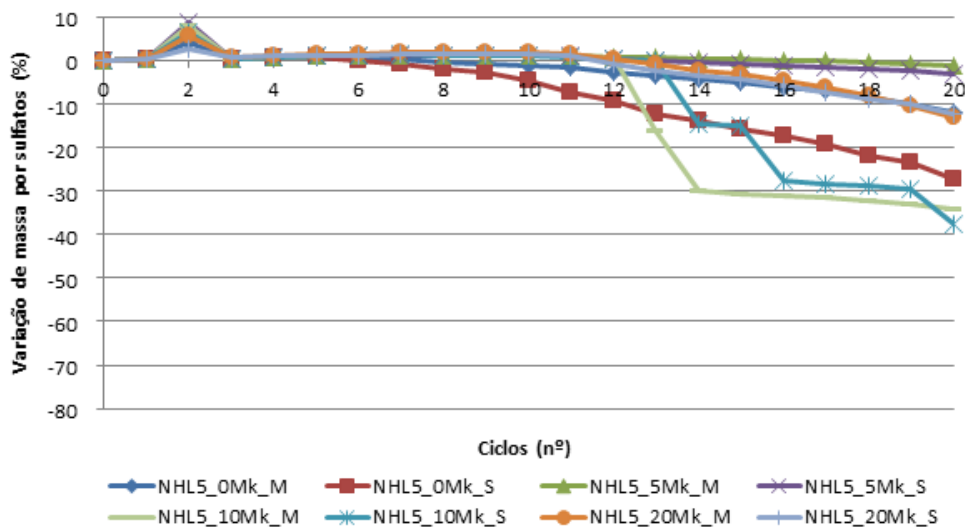


Figura 4.30 - Resistência aos sulfatos aos 28 dias

Nota-se na Figura 4.30 que nenhuma argamassa apresentou deterioração total ao fim dos 20 ciclos e observa-se que os piores resultados face ao ataque dos sulfatos (maiores perdas de massa) foram registados nas argamassas com 10% de Mk, ao passo que os melhores foram obtidos nas argamassas com 5% de Mk. As argamassas NHL5_10Mk_M e NHL5_10Mk_S foram as que menores resistências ofereceram face aos sulfatos, começando a perder massa ao 12º e 13º ciclo respectivamente, chegando ao fim do ensaio com perdas de massa na ordem dos 34% e 38%. A degradação repentina dos provetes ao 12º e 13º ciclo foi provocada por pequenas fendas na superfície dos provetes, originadas entre o 6º e o 8º ciclo, que se agravaram ao longo dos ciclos. As argamassas NHL5_0Mk_M e NHL5_0Mk_S começaram a degradar-se a partir do 6º ciclo, chegando ao fim do ensaio com perdas de massa na ordem dos 12% e 27% respectivamente. O desgaste destas argamassas, bem como das NHL5_20Mk_M e NHL5_20Mk_S, foi contínuo ao longo dos ciclos, contudo as argamassas com 20% de Mk apresentam as primeiras perdas de massa entre o 11º e o 12º ciclo e no final do ensaio registam perdas semelhantes à argamassa NHL5_0Mk_M (cerca de 12%). As argamassas que apresentam o melhor comportamento face aos sulfatos são as NHL5_5Mk_M e NHL5_5Mk_S, chegando ao fim dos 20 ciclos com cerca de 1% e 3% de perdas de massa, tendo as primeiras perdas de massa ocorrido entre o 12º e o 13º ciclo. Verifica-se assim que a resistência aos sulfatos não é proporcional à quantidade de metacaulino utilizada e que as argamassas sujeitas a uma cura em ambiente marítimo apresentam melhores resultados face ao ataque dos sulfatos, por oposição à sua semelhante sujeita a uma cura standard. No final do 1º ciclo observa-se um acréscimo involuntário de massa em todas as argamassas, que poderá ter ocorrido devido à colocação dos provetes numa zona da estufa que não se encontrava suficientemente quente, fazendo com que os provetes não se encontrassem totalmente secos na altura da pesagem.

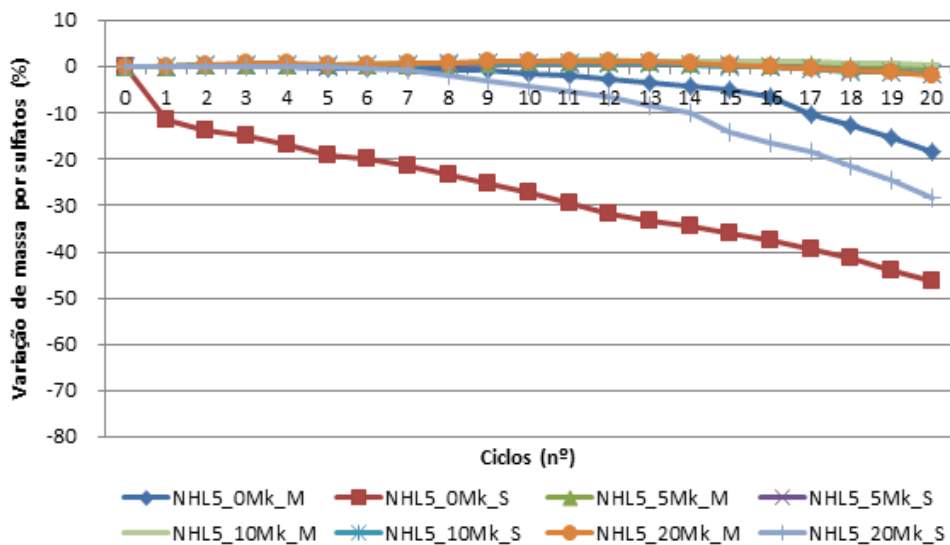


Figura 4.31 - Resistência aos sulfatos aos 90 dias

Aos 90 dias verifica-se que a argamassa NHL5_0Mk_S foi a que apresentou pior comportamento face aos sulfatos, perdendo massa em todos os ciclos, chegando ao final do ensaio com perdas de massa a rondar os 46%. As argamassas NHL5_0Mk_M e NHL5_20Mk_S apresentam um comportamento semelhante entre si, tendo ocorrido as primeiras perdas de massa a partir do 6º ciclo e terminado o ensaio com perdas na ordem dos 19% e 28% respectivamente. A degradação das argamassas sem metacaulino e NHL5_20Mk_S foi contínua ao longo dos vários ciclos de ensaio. As argamassas com 5% e 10% de Mk, bem como a NHL5_20Mk_M exibem um bom comportamento face aos sulfatos, chegando ao fim do ensaio com perdas de massa inferiores a 2%. Verifica-se inclusive um ligeiro acréscimo de massa para a argamassa NHL5_10Mk_M no final do ensaio. Através da Figura 4.31 é possível constatar que a introdução de metacaulino nas argamassas apresenta um melhor comportamento face aos sulfatos (à excepção da argamassa NHL5_20Mk_S) e que a mesma argamassa sujeita aos dois tipos de cura apresenta os piores resultados para a cura standard.

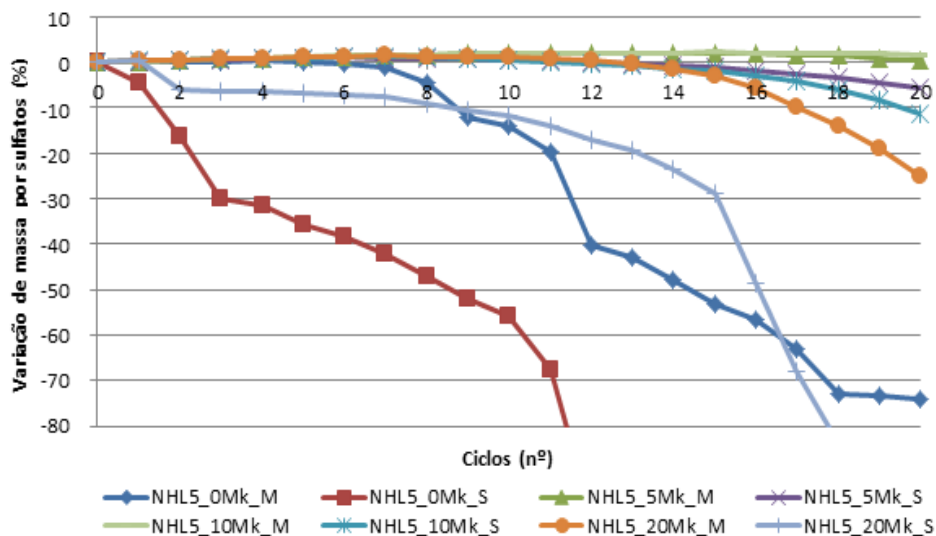


Figura 4.32 - Resistência aos sulfatos aos 180 dias

Analisando a Figura 4.32 constata-se que os piores resultados face ao ataque dos sulfatos aos 180 dias foram registados nas argamassas sem metacaulino e na argamassa NHL5_20Mk_S. A argamassa NHL5_0Mk_S foi a que que menor resistência ofereceu face aos sulfatos, perdendo massa em todos os ciclos, tendo sido a única argamassa que apresentou deterioração total antes do fim do ensaio. As argamassas NHL5_0Mk_M e NHL5_20Mk_S também se revelaram bastante degradadas ao fim dos 20 ciclos, começando a perder massa ao fim do 6º e do 2º ciclo, respectivamente, terminando o ensaio com perdas de massa na ordem dos 74% e 92%. Estas argamassas apresentam um desgaste contínuo durante vários ciclos, até ocorrer uma perda de massa repentina provocada por pequenas fendas na superfície dos provetes. As argamassas NHL5_20Mk_M, NHL5_10Mk_S e NHL5_5Mk_S começaram a degradar-se entre o 12º e o 13º ciclo, chegando ao fim do ensaio com perdas na ordem dos 25%, 12% e 6% respectivamente. A degradação destas argamassas foi contínua ao longo dos vários ciclos de ensaio. As argamassas

NHL5_5Mk_M e NHL5_10Mk_M exibiram um bom comportamento face aos sulfatos, registando-se inclusive, um ligeiro acréscimo de massa no final do ensaio. Analisando os resultados aos 180 dias constata-se que, à excepção da NHL5_20Mk_S, as argamassas com metacaulino apresentam um melhor comportamento face aos sulfatos e que a mesma argamassa sujeita aos dois tipos de cura, possui os melhores resultados para a cura marítima.

Para uma melhor percepção dos resultados obtidos, na Figura 4.33 pode ser observada a evolução com a idade da resistência aos sulfatos. É possível reforçar a ideia que a introdução de metacaulino nas argamassas apresenta uma melhoria no seu comportamento face ao ataque dos sulfatos, no entanto, esta melhoria não é directamente proporcional ao aumento do teor de Mk. As argamassas com 5% de Mk foram as que apresentaram os melhores resultados face aos sulfatos, enquanto as argamassas sem Mk apresentaram os piores resultados. As argamassas com 10% de metacaulino apresentam bons resultados a idades mais avançadas, contudo em idades mais jovens verificam-se perdas de massa consideráveis. Das argamassas que apresentam Mk na sua constituição, as que contêm 20% apresentam os piores resultados face aos sulfatos. Relativamente ao tipo de cura, constata-se novamente que as argamassas sujeitas a uma cura marítima apresentam os melhores resultados, sendo esta a cura mais apropriada para aplicar em ambientes sujeitos ao ataque de sulfatos.

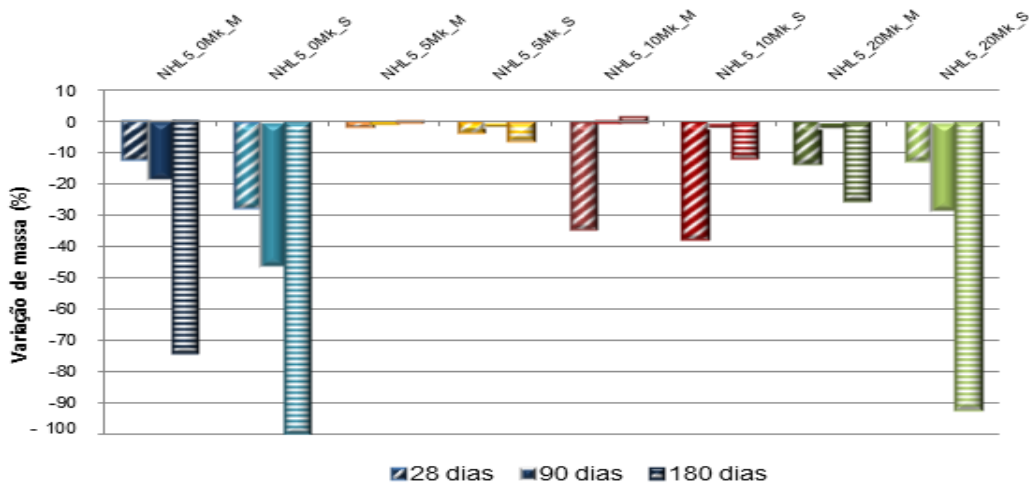


Figura 4.33 - Evolução com a idade da resistência aos sulfatos

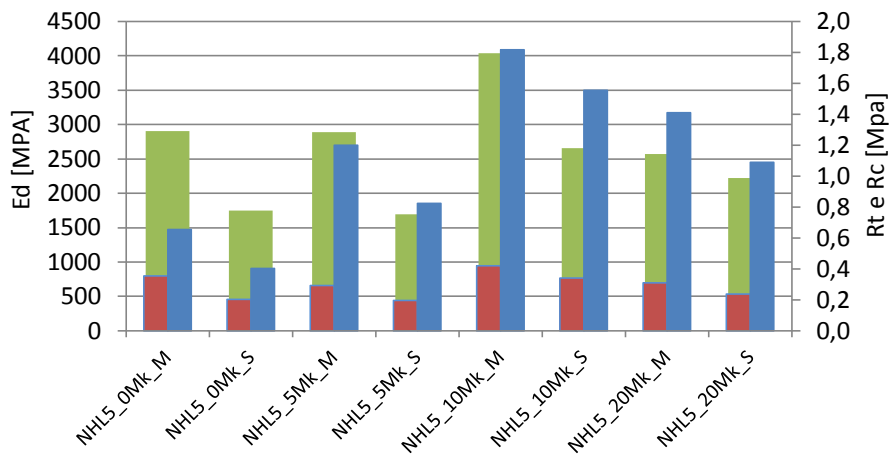
5. Discussão de Resultados

Depois de analisar individualmente os resultados de cada ensaio de caracterização pretende-se no presente capítulo interpretar e justificar o comportamento das argamassas, realizando um cruzamento dos resultados obtidos nos vários ensaios. Os resultados alcançados vão ainda ser comparados com resultados obtidos em estudos anteriores para algumas argamassas de referência: uma argamassa de cal hidráulica natural NHL5, igual à utilizada na presente dissertação e uma argamassa de cal hidráulica natural NHL3,5 comercializada e produzida pela mesma empresa. Comparam-se ainda os resultados obtidos com outros autores e apresentam-se possíveis aplicações para cada argamassa ensaiada. Realizadas as análises mencionadas, é efectuada uma avaliação das potenciais aplicações de cada argamassa no que diz respeito às exigências requeridas.

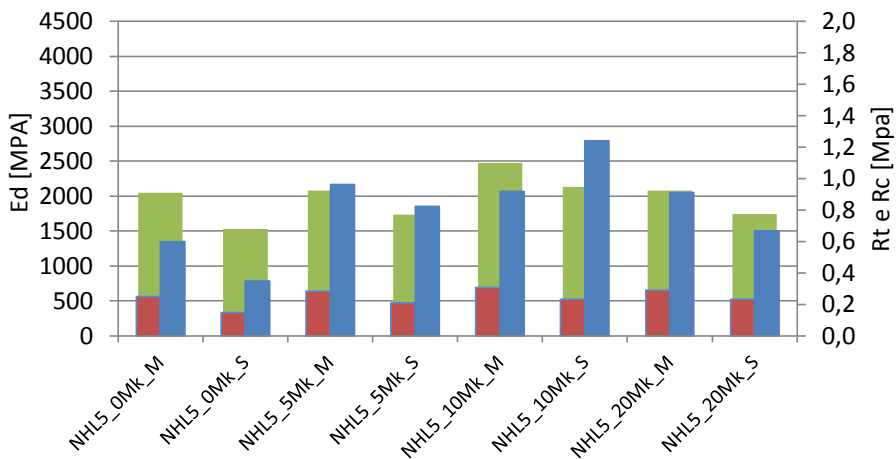
No Quadro 5.1 apresentam-se os resultados obtidos em todos os ensaios de caracterização (quadro global de resultados).

5.1. Interação entre características das argamassas

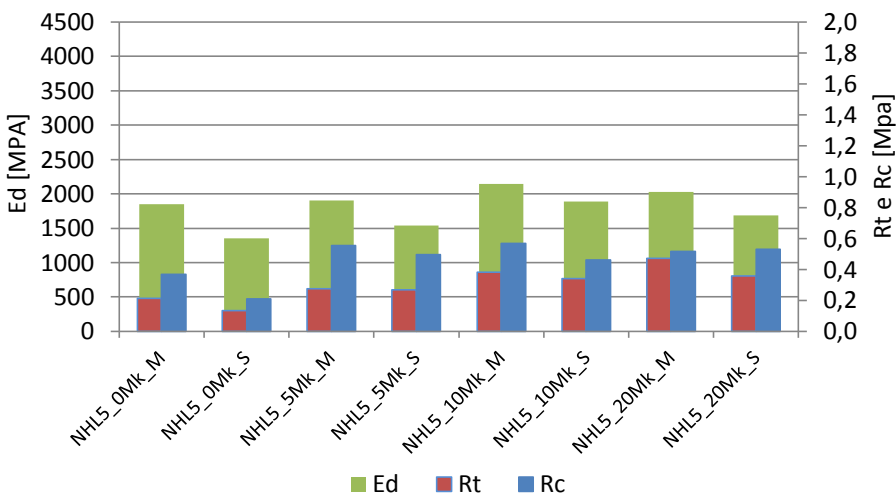
As características mecânicas (E_d , R_t , R_c) são parâmetros fundamentais para a caracterização das argamassas pois através delas podemos conhecer a sua rigidez bem como a sua capacidade resistente. As resistências mecânicas à tração e à compressão das argamassas podem ser analisadas em conjunto com o módulo de elasticidade dinâmico. Na Figura 5.1 apresenta-se, em forma de gráfico, a evolução do módulo de elasticidade e das resistências mecânicas aos 28, 90 e 180 dias. É possível observar, como esperado, uma boa correlação entre os parâmetros analisados, verificando-se evoluções semelhantes em todas as idades. De um modo geral, as resistências à tração são proporcionais às de compressão (embora de valor mais reduzido) e apresentam uma boa proporcionalidade com o módulo de elasticidade dinâmico, na medida em que valores mais elevados de R_t e R_c correspondem a valores mais elevados de E_d . De uma maneira geral a adição de metacaulino traduz-se num acréscimo das características mecânicas, dado que as argamassas sem metacaulino apresentam características mecânicas inferiores às argamassas com metacaulino. Avaliando separadamente cada cura verifica-se que as argamassas sujeitas a uma cura marítima apresentam valores de módulo elasticidade e resistências mecânicas superiores aos registados em argamassas idênticas sujeitas a uma cura standard. Estes valores mais elevados de E_d , R_t e R_c poderão ter sido influenciados pela proximidade dos provetes com o mar. A proximidade com o mar pode provocar a migração de sais solúveis para o interior dos provetes, que ao cristalizarem no seu interior resultam num material mais denso. Admitindo que os maiores teores de humidade relativa se registam para a cura marítima e que essa maior H_r contribui para uma maior reacção pozolânica, pode ser expectável este aumento das características mecânicas.



a) 28 dias



b) 90 dias



c) 180 dias

Figura 5.1 - Módulo de elasticidade dinâmico/resistência à tração e à compressão aos 28, 90 e 180 dias

Quadro 5.1 – Quadro global de resultados

Ensaio	Idade e DP	NHL5_M	NHL5_S	NHL5_5Mk_M	NHL5_5Mk_S	NHL5_10Mk_M	NHL5_10Mk_S	NHL5_20Mk_M	NHL5_20Mk_S
Ed [MPa]	28d	2907	1749	2891	1692	4042	2656	2569	2218
	DP	100	90	122	112	93	323	62	80
	90d	2051	1530	2079	1736	2477	2128	2075	1742
	DP	120	48	34	120	166	255	124	55
	180d	1848	1355	1903	1536	2142	1891	2026	1688
	DP	68	80	94	69	35	111	57	24
Rt [MPa]	28d	0,36	0,20	0,29	0,20	0,42	0,34	0,31	0,24
	DP	0,02	0,01	0,04	0,00	0,03	0,06	0,02	0,01
	90d	0,25	0,15	0,29	0,21	0,31	0,23	0,29	0,23
	DP	0,02	0,03	0,03	0,02	0,06	0,04	0,02	0,01
	180d	0,21	0,13	0,28	0,27	0,38	0,34	0,47	0,36
	DP	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,05	0,03	0,01
Rc [MPa]	28d	0,65	0,40	1,20	0,82	1,82	1,55	1,41	1,09
	DP	0,20	0,03	0,22	0,24	0,44	0,43	0,12	0,15
	90d	0,60	0,35	0,96	0,82	0,92	1,24	0,91	0,67
	DP	0,05	0,04	0,03	0,06	0,31	0,24	0,32	0,08
	180d	0,37	0,21	0,56	0,49	0,57	0,46	0,52	0,53
	DP	0,13	0,09	0,10	0,20	0,08	0,21	0,18	0,27

Quadro 5.1 – Quadro global de resultados (continuação)

Ensaio	Idade e DP	NHL5_M	NHL5_S	NHL5_5Mk_M	NHL5_5Mk_S	NHL5_10Mk_M	NHL5_10Mk_S	NHL5_20Mk_M	NHL5_20Mk_S
CC [kg/m ² .min ^{0,5}]	28d	5,15	6,65	4,45	4,77	3,34	4,04	3,34	4,32
	DP	0,15	0,13	0,63	0,15	0,10	0,41	0,14	0,16
	90d	4,73	5,41	4,02	4,16	3,19	3,52	3,74	3,95
	DP	0,14	0,27	0,35	0,27	0,22	0,10	0,25	0,01
	180d	4,83	5,52	4,33	4,40	3,58	3,98	4,36	4,26
	DP	0,44	0,14	0,11	0,01	0,22	0,12	0,31	0,05
VA [kg/m ²]	28d	20,8	22,6	20,7	21,4	21,7	21,9	23,5	24,8
	DP	1,0	0,3	0,8	0,3	2,3	1,2	0,2	1,0
	90d	20,9	22,0	21,7	21,0	21,9	20,3	22,5	22,3
	DP	1,0	0,8	1,0	1,2	1,9	0,2	0,8	1,2
	180d	20,4	17,0	22,2	20,2	23,8	22,0	22,8	23,0
	DP	1,0	5,1	2,4	0,5	1,6	2,0	1,2	0,1
TS [Kg(m ² .h)]	28d	0,067	0,056	0,064	0,055	0,063	0,055	0,064	0,070
	DP	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
	90d	0,084	0,089	0,071	0,080	0,077	0,081	0,070	0,083
	DP	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
	180d	0,062	0,072	0,084	0,079	0,084	0,092	0,098	0,094
	DP	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
IS [-]	28d	0,43	0,45	0,45	0,46	0,45	0,46	0,46	0,41
	DP	0,04	0,01	0,04	0,02	0,03	0,03	0,00	0,04
	90d	0,33	0,27	0,38	0,32	0,38	0,33	0,40	0,34
	DP	0,02	0,02	0,05	0,02	0,06	0,02	0,01	0,03
	180d	0,31	–	0,27	0,24	0,30	0,24	0,27	0,26
	DP	0,01	–	0,02	0,01	0,04	0,02	0,05	0,02

Quadro 5.1 – Quadro global de resultados (continuação)

Ensaio	Idade e DP	NHL5_M	NHL5_S	NHL5_5Mk_M	NHL5_5Mk_S	NHL5_10Mk_M	NHL5_10Mk_S	NHL5_20Mk_M	NHL5_20Mk_S
Pab [%]	28d	27,8	28,6	24,8	25,5	25,7	25,3	23,6	23,7
	DP	4,1	0,3	1,1	0,9	1,1	0,0	1,4	0,9
	90d	19,5	–	21,2	19,8	21,0	19,6	21,0	21,0
	DP	0,3	–	0,2	0,4	0,4	2,0	0,2	0,4
	180d	18,1	–	19,1	19,3	20,7	20,5	21,3	21,6
	DP	0,9	–	1,9	0,2	0,2	0,2	0,8	0,8
MVA [kg/m ³]	28d	1636	1627	1683	1680	1679	1687	1722	1707
	DP	108	4	26	13	39	10	24	14
	90d	1858	–	1843	1866	1849	1854	1822	1836
	DP	13	–	6	5	7	9	3	7
	180d	1876	–	1892	1886	1850	1850	1819	1807
	DP	9	–	36	6	9	10	27	13
λ [W/m.K]	28d	0,683	0,612	0,709	0,646	0,758	0,638	0,598	0,578
	DP	0,017	0,040	0,062	0,013	0,067	0,036	0,048	0,047
	90d	0,633	0,559	0,668	0,684	0,682	0,651	0,592	0,574
	DP	0,062	0,016	0,075	0,057	0,040	0,042	0,108	0,036
	180d	0,731	0,669	0,748	0,703	0,702	0,683	0,659	0,602
	DP	0,101	0,025	0,020	0,033	0,036	0,030	0,048	0,034
Sulfatos: Variação de massa ao 20º ciclo	28d	-12,0	-27,3	-1,4	-3,3	-34,1	-37,6	-13,0	-12,4
	90d	-18,5	-46,2	-0,3	-1,6	0,5	-1,6	-1,9	-28,5
	180d	-74,3	-100,0	0,5	-5,9	1,5	-11,6	-25,2	-92,1

As características mecânicas registadas em idade jovem apresentam tendência para diminuem com o tempo. Este facto pode estar associado aos compostos hidráulicos/pozolânicos formados no início das reacções químicas durante o processo de cura que, por serem instáveis, desaparecem ao longo do tempo, reduzindo assim a resistência e rigidez da argamassa [BANDEIRA, 2012].

Através da relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão é possível obter a deformabilidade das argamassas. Quanto mais elevado for a relação R_t/R_c maior a deformabilidade. Um comportamento mais deformável permitirá otimizar as resistências das argamassas às tensões criadas, sem que sejam transmitidos esforços muito elevados para o suporte [FARIA, 2004]. Observando a Figura 5.2, que traduz o quociente entre as resistências à tração e à compressão com a idade, constata-se que a presença de metacaulino reduz este quociente em idades mais jovens. Contudo, em idades mais avançadas (180 dias) regista-se o oposto, dado que as argamassas com metacaulino apresentam um quociente R_t/R_c mais elevado (à excepção das argamassas com 5% de Mk), indicando assim uma melhor deformabilidade. Não é possível estabelecer uma relação entre a deformabilidade e o módulo de elasticidade dinâmico.

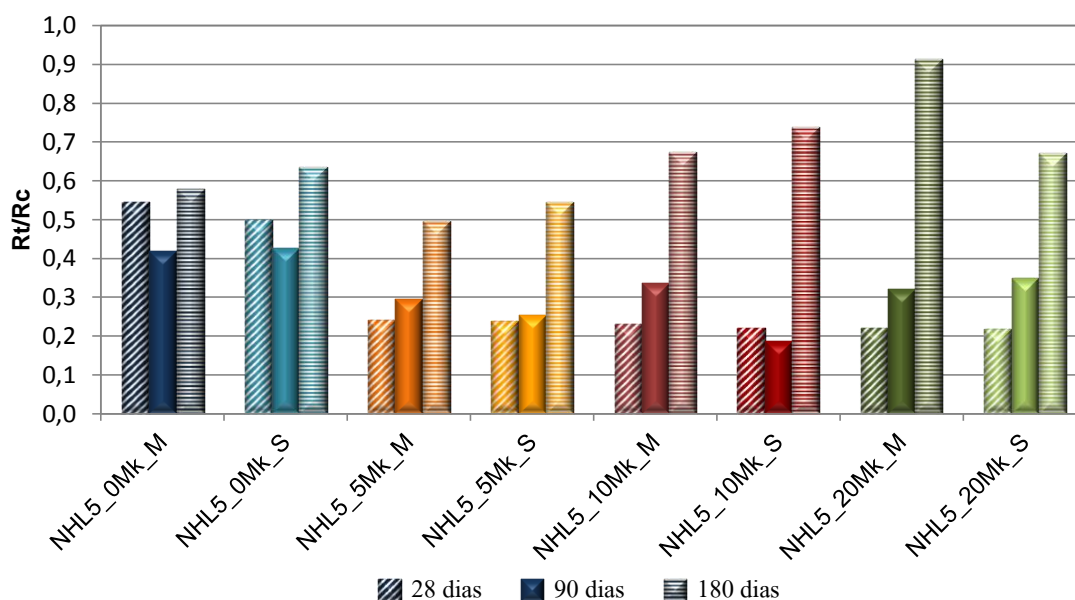


Figura 5.2 - Quociente entre as resistências à tração e à compressão com a idade

Como as resistências mecânicas apresentam evoluções semelhantes, nas Figuras 5.3 e 5.4 apresentam-se, comparativamente, os valores da resistência à tração e da porosidade aberta, assim como os valores de módulo de elasticidade e da porosidade aberta de todas as argamassas e respectiva condição de cura com a idade.

Uma maior porosidade aberta (logo menor compacidade) deveria conduzir a menores resistências mecânicas e um menor módulo de elasticidade. No entanto, analisando a Figura 5.3 pode-se verificar, ao contrário do que seria expectável, uma relação entre os resultados obtidos de porosidade aberta com as resistências mecânicas e com o módulo de elasticidade, na medida em que maiores valores de porosidade aberta estão associados a elevados valores de resistência

mecânica e de módulo de elasticidade. Esta relação pode ser explicada pela utilização de uma cal hidráulica natural, produzida em Junho de 2011, resultante de um lote distinto da até então comercializada pela Secil como NHL5, que possa eventualmente conter adições ou compostos desconhecidos que influenciam os resultados. Por outro lado, este comportamento pode também ter ser influenciado pela dimensão e quantidade de poros.

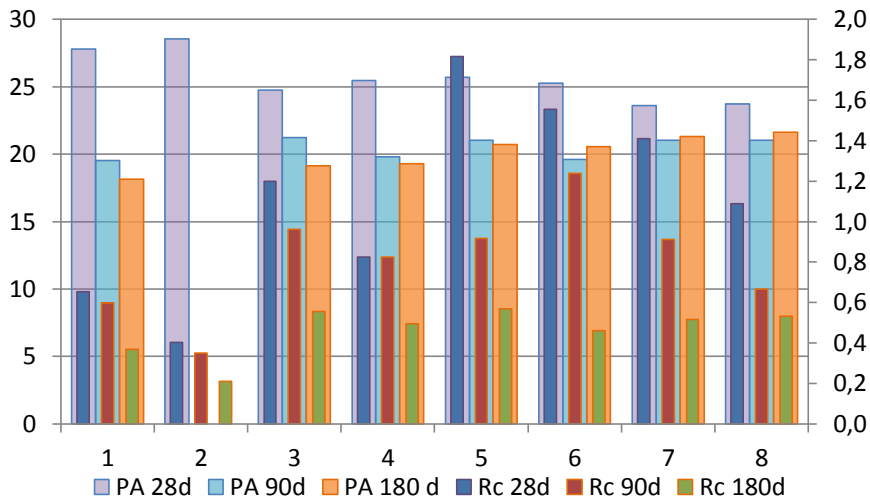


Figura 5.3 - Porosidade aberta/ resistência à compressão

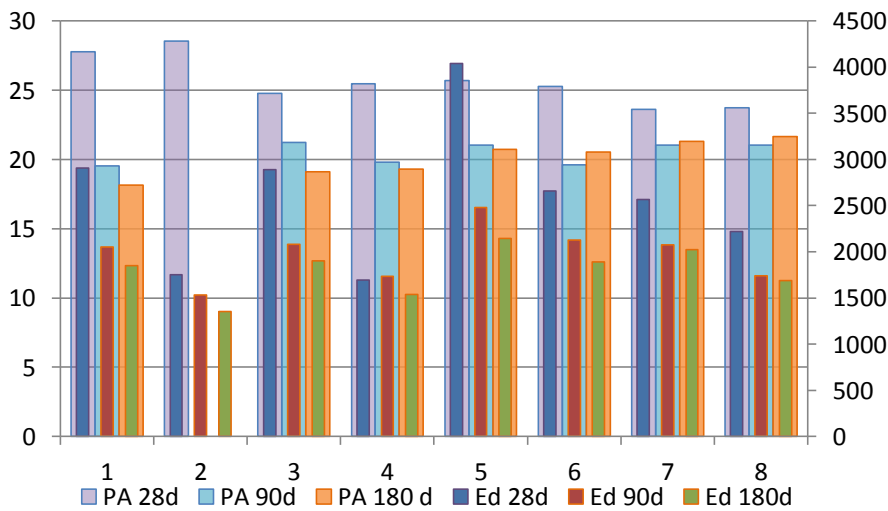
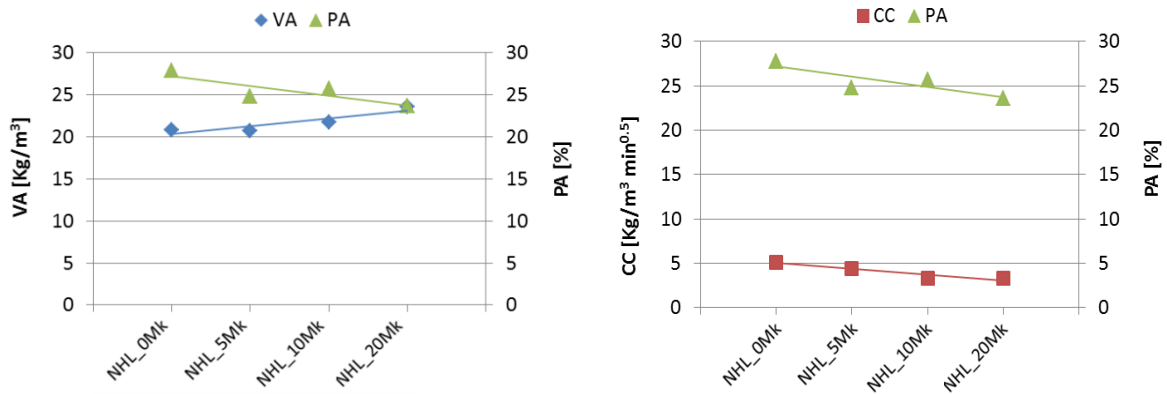


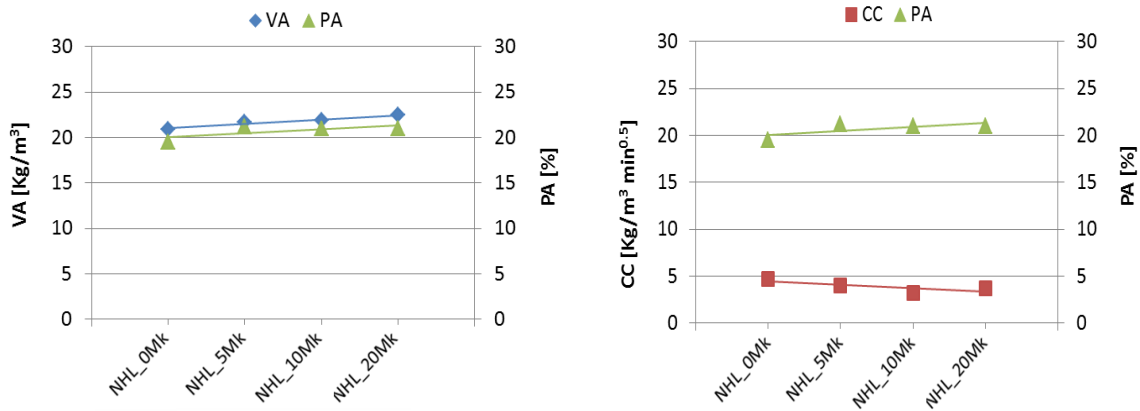
Figura 5.4 - Porosidade aberta/módulo de elasticidade dinâmico

Considera-se que o comportamento de uma argamassa face à acção da capilaridade depende essencialmente das características da sua estrutura porosa. Neste sentido, o valor assintótico obtido no ensaio de absorção de água por capilaridade depende, além de outros factores, da porosidade aberta total, enquanto o coeficiente de absorção de água por capilaridade é influenciado pela porometria das argamassas. Todavia, como o ensaio de porometria não foi realizado na presente dissertação, faz-se uma relação entre o ensaio de absorção capilar e o ensaio de porosidade aberta. Uma vez que estes parâmetros apresentam uma evolução semelhante em ambas as curas, na Figura 5.5 apresentam-se, comparativamente, os resultados da porosidade aberta com a quantidade total de água absorvida por capilaridade (traduzida pelo

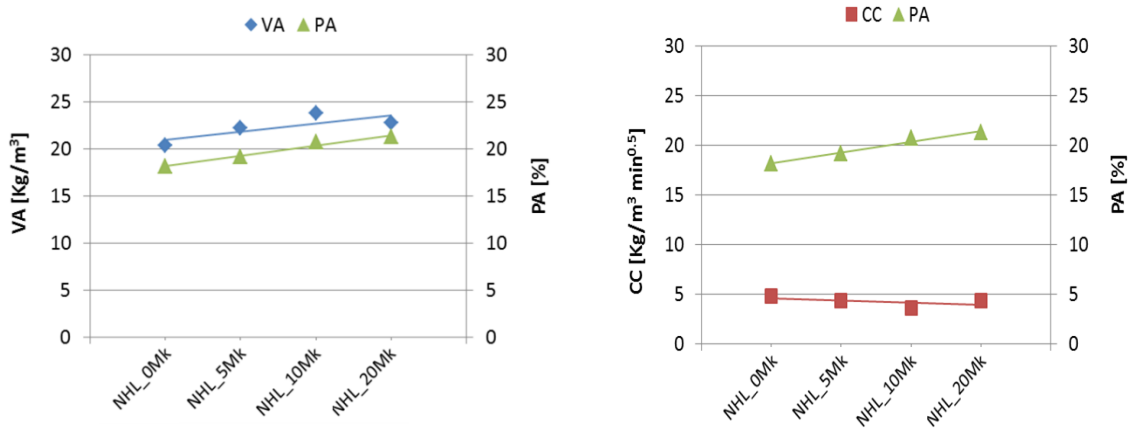
valor assintótico), com a velocidade de absorção inicial (traduzida pelo coeficiente de capilaridade) obtidos para a cura marítima, em todas as idades de caracterização, de acordo com o aumento da percentagem de substituição de massa de cal por metacaulino.



a) 28 dias



b) 90 dias

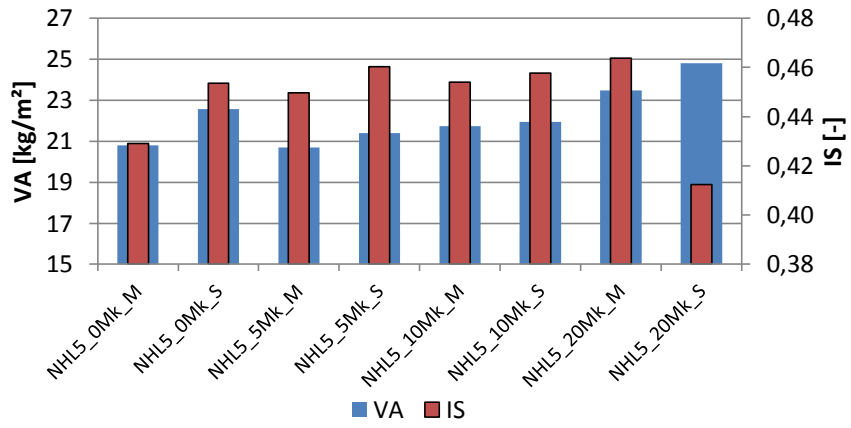


c) 180 dias

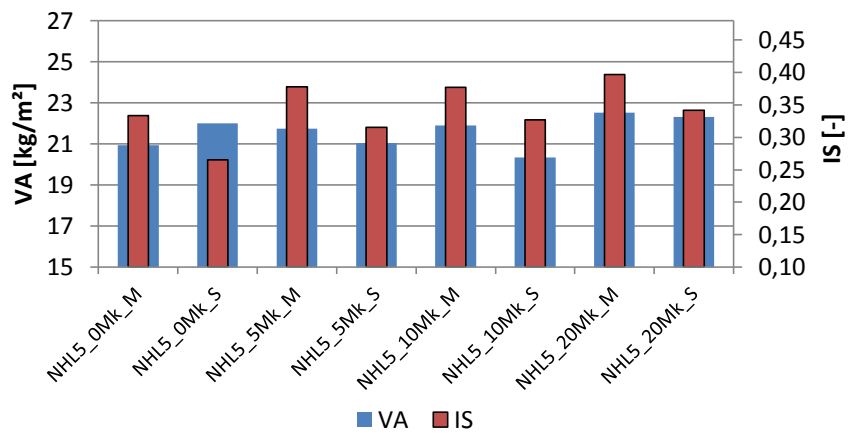
Figura 5.5 - Porosidade aberta/ valor assintótico/velocidade de absorção inicial aos 28, 90 e 180 dias para as argamassas sujeitas a cura marítima

Analisando a Figura 5.5 é possível observar nas três idades de caracterização uma boa correlação entre a evolução do valor assintótico e do coeficiente de capilaridade, uma vez que argamassas com menor velocidade de absorção inicial (CC) apresentam de um modo geral maior quantidade total de água absorvida (VA). Cruzando esta informação com os resultados de porosidade aberta verificam-se padrões distintos consoante a idade de caracterização: Em idades mais jovens, 28 dias, observa-se que maiores valores de porosidade aberta proporcionam menores valores de VA, que por sua vez conduzem a maiores valores de CC. Por outro lado, em idades mais avançadas (90 e 180 dias) verifica-se, como expectável, que a evolução da porosidade aberta acompanha a distribuição dos valores de VA, constatando-se assim que menores valores de porosidade aberta correspondem, geralmente, a menores valores de VA, que por sua vez conduzem a maiores valores de CC.

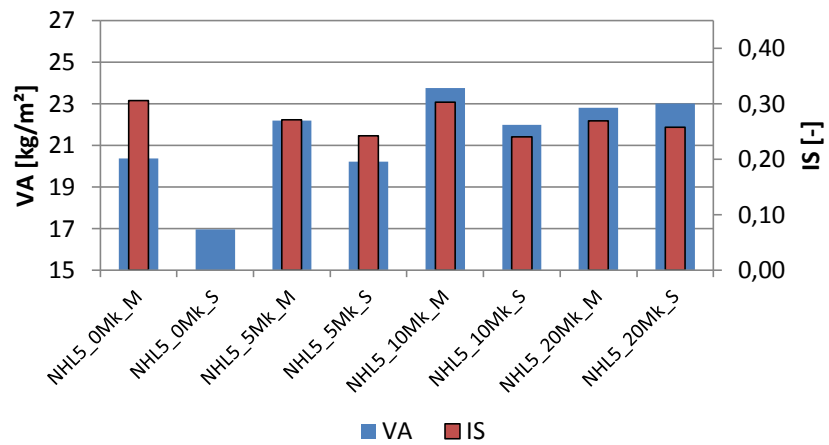
A porosidade aberta, a absorção de água por capilaridade e a secagem condicionam o comportamento face à água das argamassas, uma vez que para uma maior ou menor quantidade de água que penetra na argamassa deve existir uma maior ou menor facilidade e rapidez de secagem dessa água [FARIA, 2004]. Na figura 5.6 apresenta-se a relação entre a absorção de água por capilaridade (dada pelo valor assintótico) e a facilidade de secagem de uma argamassa (dada pelo índice de secagem). De uma maneira geral verifica-se uma boa correlação entre a evolução de VA e IS, já que argamassas que apresentem maior quantidade de água absorvida (maior VA) são as que apresentam uma maior dificuldade de secagem (maior IS). Cruzando esta informação com a evolução da porosidade aberta não foi identificada qualquer relação, assim como não foi identificada qualquer relação entre o coeficiente de capilaridade e taxa de secagem.



a) 28 dias



b) 90 dias



c) 180 dias

Figura 5.6 – Valor assintótico/índice de secagem

A secagem é um dos aspectos mais importantes na avaliação do comportamento das argamassas, pois é um indicador da durabilidade do suporte. É importante que uma argamassa consiga iniciar rapidamente a secagem (maiores valores de TS) e que essa secagem se processe de uma forma continuada (menores valores de IS). Uma vez que estes parâmetros demonstram uma evolução semelhante nas três idades de caracterização, na Figura 5.7 apresentam-se os resultados da TS e do IS aos 90 dias, de acordo com o aumento da percentagem de substituição de massa de cal por metacaulino. Verifica-se uma boa correlação entre a TS e o IS, na medida em que maiores valores de TS correspondem a menores valores de IS

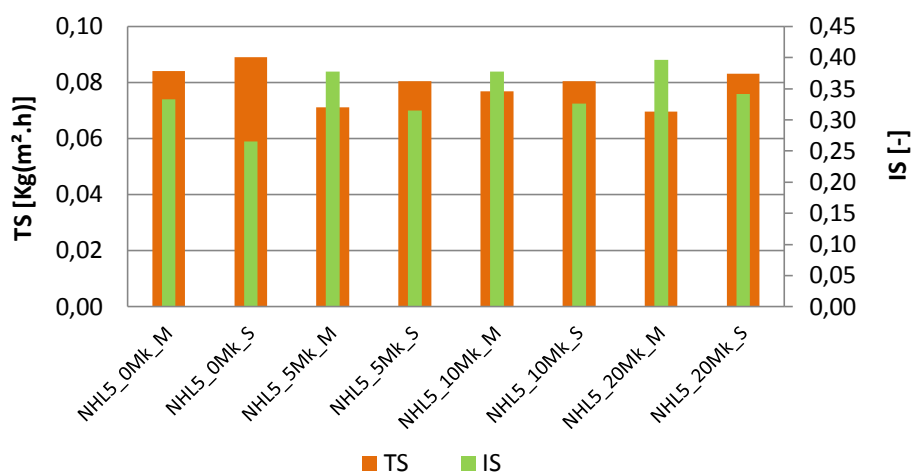


Figura 5.7 – Taxa de secagem/índice de secagem

5.2. Aplicações das argamassas estudadas

Neste subcapítulo proceder-se-á a uma análise das argamassas estudadas quanto ao fim a que se destinam e vão ser analisadas as características pretendidas para obter uma aplicação adequada.

Do ponto de vista da compatibilidade em edifícios antigos, Veiga [VEIGA, 2010] definiu requisitos mínimos e máximos para algumas características das argamassas de substituição e refechamento de juntas, nomeadamente as características mecânicas e o seu comportamento face à água (Quadro 2.1). De acordo com os autores, os requisitos estabelecidos são referentes a ensaios aos 90 dias de idade, sendo que é com base nesses valores que se vão classificar as argamassas estudadas quanto ao fim a que se destinam. Na Figura 5.8 mostra-se, comparativamente, os resultados obtidos aos 90 dias com os requisitos definidos para edifícios antigos. Analisando a Figura 5.8 constata-se que, à excepção da NHL5_0Mk_S, todas as outras argamassas apresentam valores de resistência à tração dentro dos limites definidos por Veiga para a utilização em rebocos, porém, para a utilização em refechamento de juntas nenhuma argamassa se encontra no intervalo requerido. As argamassas sujeitas a uma cura standard que

se encontram dentro dos limites preconizados para a utilização em rebocos, revelam no entanto, valores de R_t próximos dos mínimos definidos.

Em termos de resistência à compressão, verifica-se que, à exceção da NHL5_0Mk_S, todas as argamassas apresentam valores adequados para a aplicação como reboco ou refechamento de juntas.

Relativamente ao módulo de elasticidade, à exceção da NHL5_10Mk_S, todas as argamassas sujeitas a uma cura standard apresentam-se inadequadas para a aplicação em edifícios antigos, já que registam valores de E_d inferiores ao limite mínimo indicado tanto para a utilização em rebocos, como para o refechamento de juntas. Por outro lado, as argamassas sujeitas a uma cura marítima apresentam valores de E_d dentro dos limites requeridos para a aplicação como reboco, contudo não se enquadram nos valores definidos para refechamento de juntas.

Analisando somente as características mecânicas (R_t, R_c, E_d), observa-se que nenhuma argamassa regista valores adequados para aplicação em refechamento de juntas. Por outro lado, as argamassas sujeitas a uma cura marítima, assim como a argamassa NHL5_10Mk_S, exibem valores dentro dos limites definidos para a utilização em rebocos.

Para além das características mecânicas é fundamental analisar o comportamento das argamassas face à água de modo a evitar que a água penetre com facilidade ou então, a água que penetre seja facilmente expulsa (secagem rápida) [PENAS, 2008]. Comparando os valores de coeficiente de capilaridade com os requisitos mínimos indicados por Veiga, verifica-se que todas as argamassas estudadas apresentam velocidades de absorção capilar consideravelmente altas, sendo que nenhuma apresenta valores adequados para aplicações em edifícios antigos. Como o coeficiente de capilaridade é dado pelo declive do troço inicial da curva de absorção capilar e uma vez que não se conhece o intervalo de valores definidos por Veiga para determinar esse declive, esta discrepância de valores entre os definidos por Veiga e os obtidos no presente estudo pode estar relacionada com diferentes maneiras de determinar o CC.

Comparativamente a outros estudos que seguiram o mesmo procedimento experimental verifica-se que os valores obtidos de coeficiente de capilaridade aos 90 dias são novamente superiores aos registados por Grilo [GRILO, 2013] e por Carneiro [CARNEIRO, 2012], que estudaram argamassas com base em cal hidráulica (NHL3,5 e NHL5) e cal aérea.

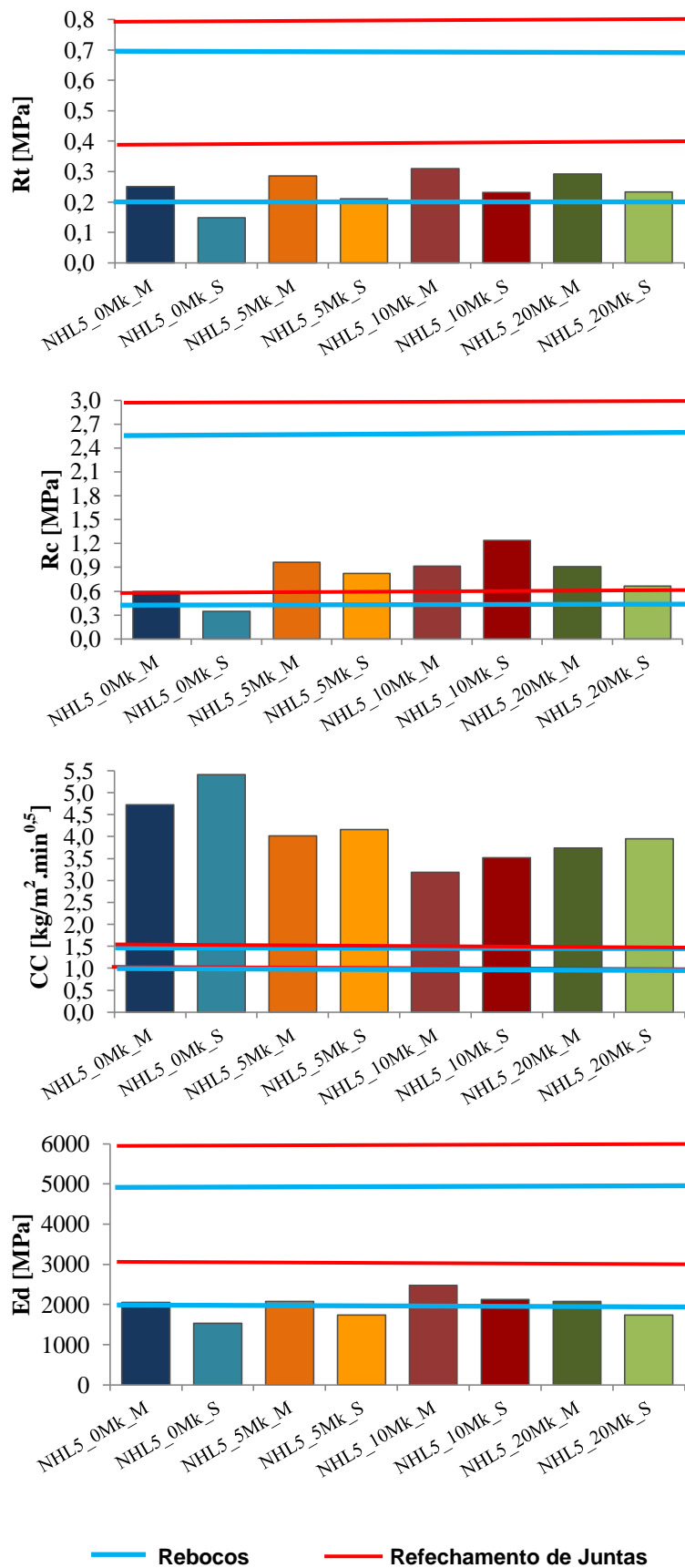


Figura 5.8 - Parâmetros de classificação de argamassas para rebocos e refechamento de juntas, segundo [VEIGA, 2010]

De acordo com a norma EN 998-1 [CEN, 2010] foram definidas gamas de valores para diversas características das argamassas a serem aplicadas como rebocos. Essas gamas de valores definem limites inferiores e superiores para vários parâmetros de caracterização, dos quais se destaca a resistência à compressão e o coeficiente de absorção capilar (aos 28 dias), já que foram os parâmetros ensaiados no presente estudo. Na Figura 5.9 apresenta-se, comparativamente, os resultados de Rc e CC das diversas argamassas aos 28 dias com os requisitos definidos na norma EN 998-1 [CEN, 2010] para utilização como rebocos.

Comparando os resultados obtidos de resistência à compressão com os requisitos para argamassas de reboco, constata-se que, à exceção da argamassa NHL5_0Mk_S, todas as outras apresentam valores de Rc suficientes para obterem classificação segundo a norma. De acordo com as categorias definidas na norma, todas as argamassas passíveis de classificação podem ser enquadradas na categoria SC1 (menores características mecânicas), no entanto as argamassas com 10% de metacaulino podem também ser enquadradas na categoria SC2.

Verifica-se ainda que os valores obtidos referentes ao coeficiente de capilaridade, tal como na comparação com os requisitos definidos por Veiga, são bastante superiores aos valores propostos pela norma para classificação das argamassas como W1 e W2, sendo que todas as argamassas se enquadram na categoria W0 (sem categoria). Deste modo é possível afirmar que, face aos requisitos da norma EN 998-1 [CEN, 2010], todas as argamassas, à exceção da argamassa NHL5_0Mk, apresentam valores adequados para serem utilizados como rebocos.

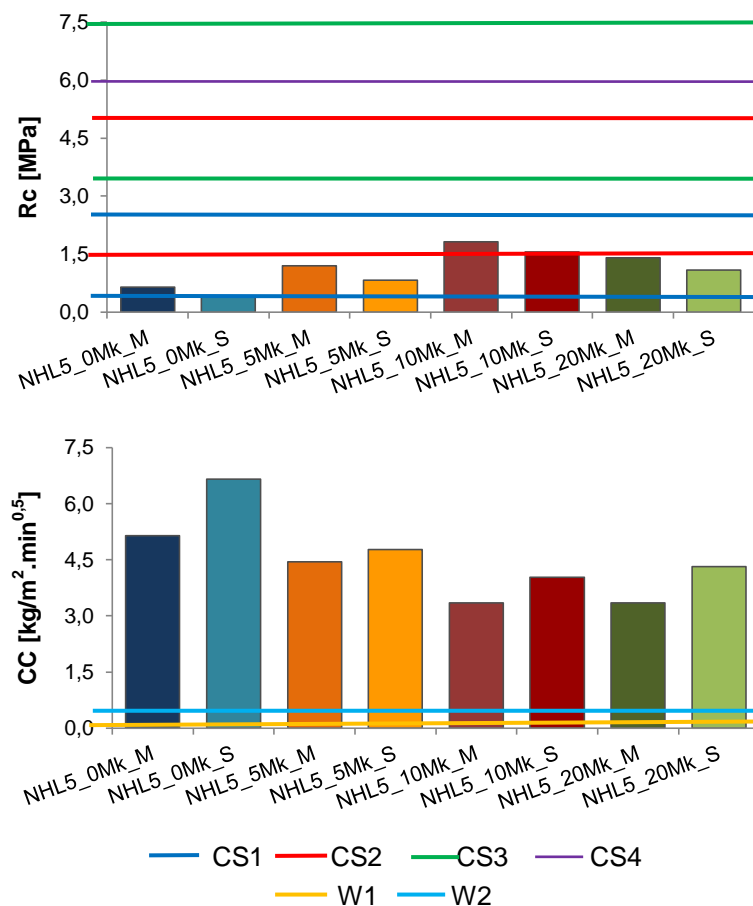


Figura 5.9 - Parâmetros de classificação de argamassas para rebocos, segundo a EN 998-1 [CEN, 2010]

5.3. Comparação com outros estudos

Foram realizados outros trabalhos de investigação onde se estudaram argamassas segundo os mesmos procedimentos experimentais, assim como o mesmo tratamento de dados que os usados no presente estudo. Dos trabalhos já executados sobre o tema, através dos quais foi possível uma comparação directa entre os resultados, destaca-se o desenvolvido por Carneiro [Carneiro, 2012] e por Grilo [GRILO, 2013]. Carneiro estudou argamassas com base em cal hidráulica natural NHL5 (do mesmo lote da utilizada na presente dissertação), ao mesmo traço volumétrico (1:3), com substituições parciais de massa de cal hidráulica por Mk, sujeitas a dois tipos de cura (húmida e standard), aos 28, 90 e 180 dias de idade. Como a cal utilizada por Carneiro é igual à utilizada na presente dissertação, a comparação com este estudo será feita de acordo com o tipo de cura que as argamassas foram sujeitas. No Quadro 5.2 apresenta-se uma descrição das argamassas estudadas por Carneiro de acordo com o traço volumétrico, a percentagem de substituição de metacaulino, assim como o tipo de cura a que as argamassas foram sujeitas.

Quadro 5.2 - Traço volumétrico, teor em Mk e respectiva condição de cura das argamassas estudadas por Carneiro [Carneiro, 2012]

Designação	Traço volumétrico	Teor em Mk	Cura
NHL5_0Mk_H	1:3	0	H
NHL5_5Mk_H	1:3	5	H
NHL5_10Mk_H	1:3	10	H
NHL5_20Mk_H	1:3	20	H

Como as evoluções com a idade do módulo de elasticidade dinâmico e das resistências à tração e compressão são semelhantes em ambos os estudos, apresenta-se a título de exemplo na Figura 5.10 a comparação realizada aos 28 dias entre as características mecânicas das argamassas sujeitas a cura húmida, ensaiadas por Carneiro, com as argamassas sujeitas a cura marítima e standard ensaiadas no presente estudo. Analisando a Figura 5.10 constata-se que as argamassas sujeitas a uma cura húmida apresentam a todas as idades e independentemente da percentagem de substituição de massa de cal por metacaulino, valores de módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas superiores aos registados para argamassas sujeitas a uma cura marítima e standard.

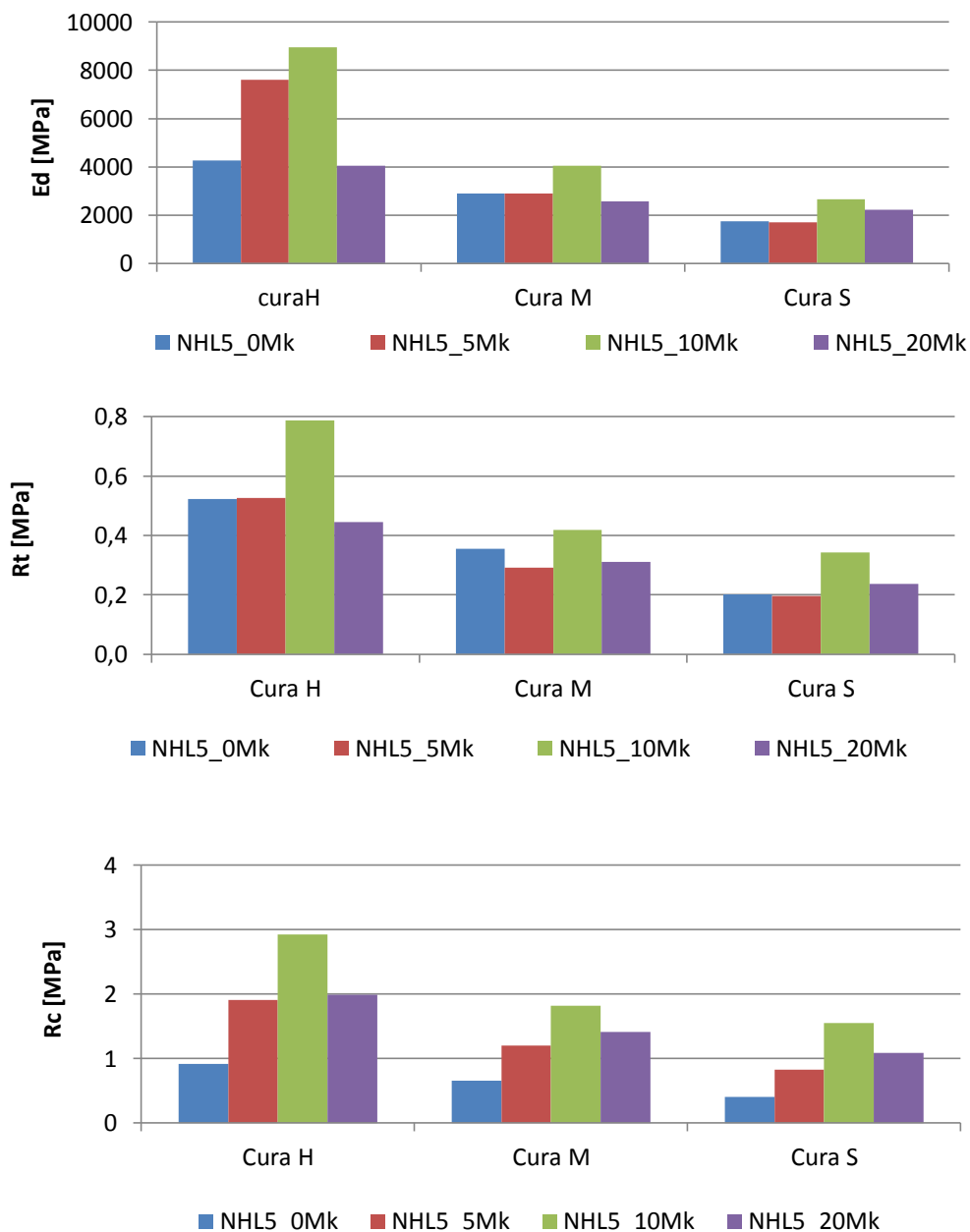


Figura 5.10 - Comparação realizada aos 28 dias entre as características mecânicas das argamassas ensaiadas por Carneiro, com as argamassas ensaiadas no presente estudo.

Na figura 5.11 apresenta-se a título de exemplo a evolução da porosidade aberta e do coeficiente de capilaridade das argamassas sujeitas a cura húmida, marítima e standard, aos 90. De acordo com a Figura 5.11 é possível verificar que as argamassas sujeitas a uma cura húmida apresentam valores de Pab superiores aos obtidos no presente estudo, contudo a idades mais jovens (28 dias) a diferença de valores não é tão acentuada como em idades mais avançadas (90 e 180 dias). Relativamente à evolução do CC verifica-se que as argamassas sujeitas a uma cura húmida apresentam a todas as idades, e independentemente da percentagem de Mk, valores inferiores aos obtidos para uma cura marítima ou standard. Essa diferença de valores entre a cura húmida e as restantes curas não é tão evidente a idades mais avançadas (180 dias).

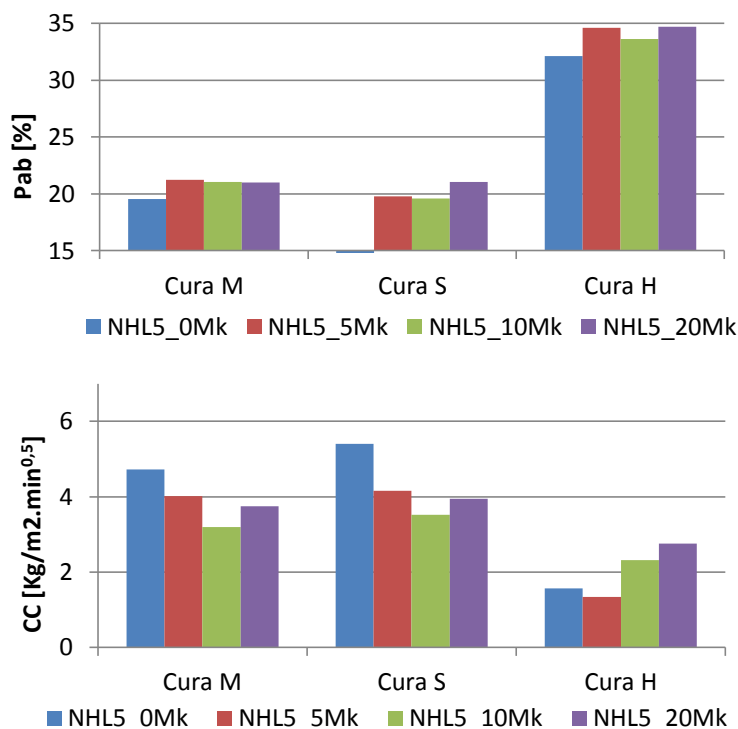


Figura 5.11 - Comparação realizada aos 90 dias entre a Pab e o CC das argamassas ensaiadas por Carneiro, com as argamassas ensaiadas no presente estudo.

O estudo desenvolvido por Grilo [GRILLO, 2013] consistiu na caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5, ao traço volumétrico de 1:3 de cal e areia, com substituições parciais de massa de cal por Mk, sujeitas a três tipos de cura (húmida, marítima e standard), aos 28, 90 e 180 dias de idade. Como a cal hidráulica natural utilizada por Grilo é diferente da usada no presente estudo (produzida depois da entrada em vigor da norma NP EN 459-1:2011, a comparação com este estudo será feita de acordo com o tipo de cal hidráulica utilizada. No Quadro 5.3 apresenta-se uma descrição das argamassas estudadas por Grilo de acordo com o traço volumétrico, a percentagem de substituição de metacaulino, assim como o tipo de cura a que as argamassas foram sujeitas.

Quadro 5.3 - Traço volumétrico, teor em Mk e respectiva condição de cura das argamassas estudadas por Grilo [Grilo, 2012]

Designação	Traço volumétrico	Teor em Mk	Cura
NHL3,5_0Mk_M	1:3	0	M
NHL3,5_0Mk_S	1:3	0	S
NHL3,5_10Mk_M	1:3	10	M
NHL3,5_10Mk_S	1:3	10	S
NHL3,5_20Mk_M	1:3	20	M
NHL3,5_20Mk_S	1:3	20	S

Como as evoluções com a idade do módulo de elasticidade dinâmico e das resistências à tração e compressão são semelhantes em ambos os estudos, apresenta-se na Figura 5.12 a comparação entre as características mecânicas das argamassas realizadas com cal hidráulica NHL5 e NHL3.5 aos 28 dias. Uma análise da Figura 5.12 permite observar que as argamassas realizadas com cal hidráulica NHL3.5 apresentam a todas as idades, independentemente da percentagem de substituição de massa de cal por metacaulino e do tipo de cura, valores de módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas superiores aos registados para argamassas realizadas com base em cal hidráulica NHL5.

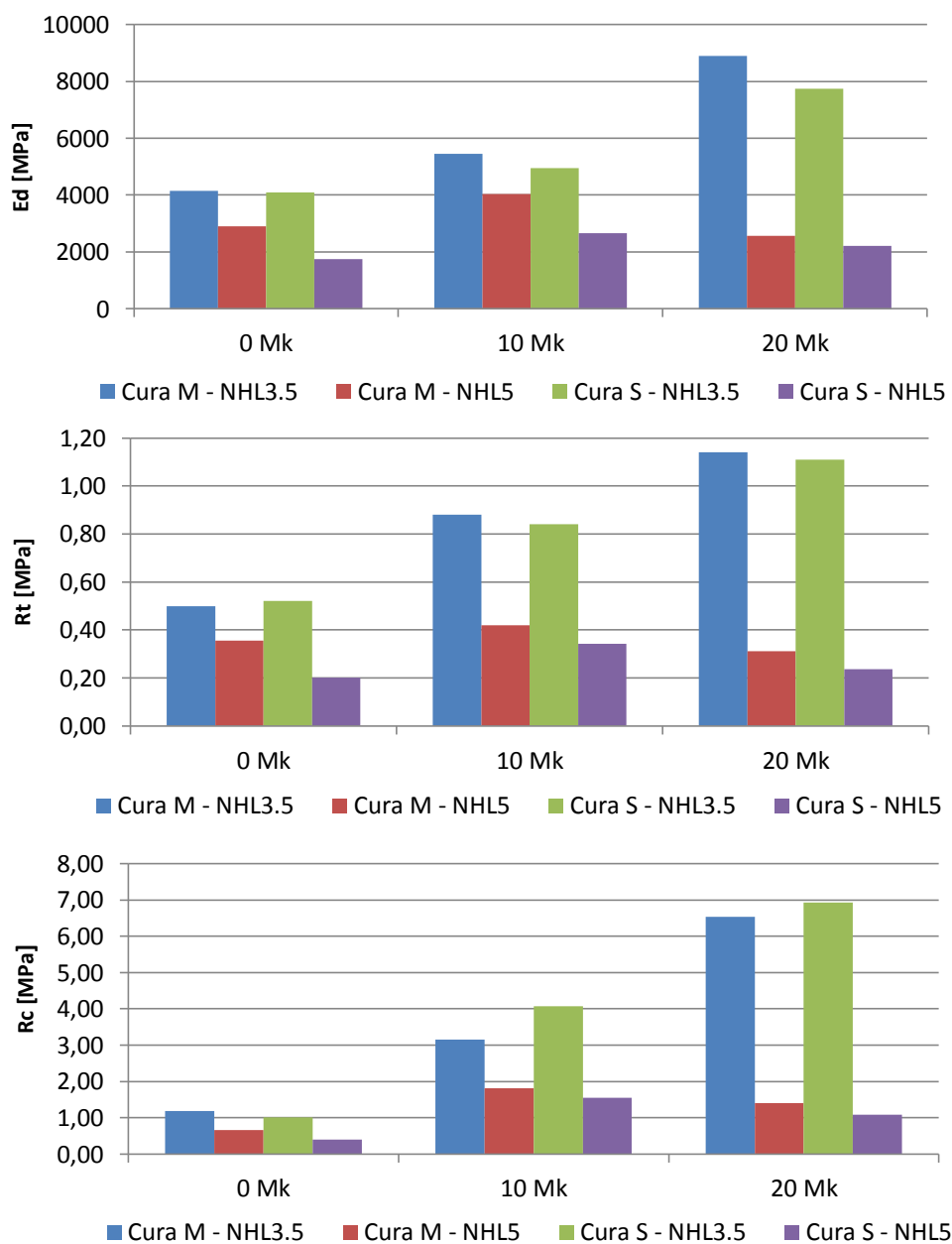


Figura 5.12 - Comparação realizada aos 28 dias entre as características mecânicas das argamassas ensaiadas por Grilo, com as argamassas ensaiadas no presente estudo.

Como as evoluções com a idade porosidade aberta, do coeficiente de capilaridade e da taxa de secagem são semelhantes em ambos os estudos, apresenta-se na Figura 5.13 a comparação entre estes parâmetros das argamassas realizadas com cal hidráulica NHL5 e NHL3.5 aos 28 dias. Através da Figura 5.13 é possível constatar que as argamassas produzidas com cal hidráulica NHL3.5 revelam, independentemente da cura, da idade e da percentagem de Mk, valores de PA e de TS superiores aos registados para argamassas com base em cal hidráulica NHL5. Destaca-se o facto de, em idades mais jovens (28 dias), todas as argamassas apresentarem valores de PA semelhantes entre curas e a idades mais avançadas (90 e 180 dias) registarem valores de TS também semelhantes para ambas as curas. Em relação ao coeficiente de capilaridade comprova-se que as argamassas estudadas por Grilo mostram, independentemente da percentagem de substituição de massa de cal por metacaulino e do tipo de cura, valores de CC inferiores aos registados para argamassas com base em cal hidráulica NHL5 produzidas no presente estudo

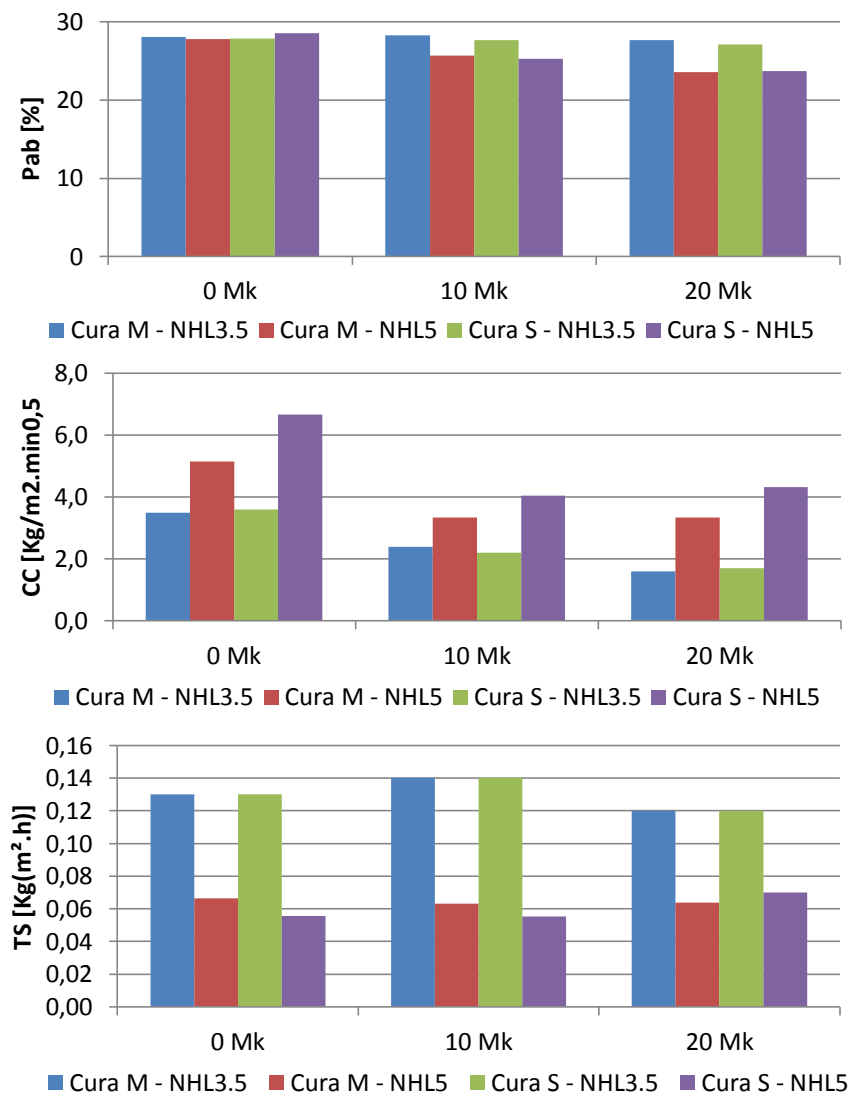


Figura 5.13 - Comparação realizada aos 28 dias entre a Pab, o CC e a TS das argamassas ensaiadas por Grilo, com as argamassas ensaiadas no presente estudo.

6. Conclusões e Sugestões Para Trabalhos Futuros

6.1. Conclusões

Tendo em conta a crescente necessidade de preservação e recuperação do parque edificado existente em Portugal devido à sua degradação acentuada, perspectiva-se uma mudança no sector da construção civil direccionando a actividade para a conservação e reabilitação do património edificado. Nestas intervenções de conservação e reabilitação de edifícios, a escolha da argamassa de substituição é fundamental para se obter uma solução compatível com os materiais pré-existentes (que não contribua para a degradação do suporte) e que acrescente durabilidade ao conjunto. Neste sentido, as argamassas com base em cal hidráulica natural aparecem com opção viável por constituírem soluções fáceis de usar e apresentarem boa compatibilidade com suportes pré-existentes. A cal hidráulica natural apresenta uma maior consistência ambiental em relação a outros ligantes, uma vez que é obtida por cozedura de pedra calcária a temperaturas de cozedura inferiores, libertando assim menos dióxido de carbono para a atmosfera. Após a entrada em vigor da nova versão da norma das cais de construção, foram definidas novas classificações das cais com propriedades hidráulicas, sendo por isso necessário reclassificar ou reformular muitas das cais anteriormente denominadas como naturais [FARIA, 2012]

Com a presente dissertação, inserida no âmbito dos projectos FCT METACAL e LIMECONTECH, pretendeu-se avaliar a influência do tipo de cura, assim como a importância da adição de metacaulino em argamassas com base em cal hidráulica natural NHL5 classificada de acordo com a última revisão da norma. Para isso, foram produzidas quatro argamassas diferentes ao traço volumétrico de 1:3, com substituições parciais de massa de cal hidráulica por metacaulino (0, 5, 10, 20%). Posteriormente, todas as argamassas produzidas foram colocadas na respectiva condição de cura (cura em ambiente marítimo, na estação de exposição natural do LNEC no Guincho e cura numa sala climatizada com condições de humidade relativa $65\pm 5\%$ e temperatura $20\pm 3^\circ\text{C}$) e caracterizadas aos 28, 90 e 180 dias de idades, através de ensaios mecânicos e físicos.

A caracterização das argamassas no estado fresco, realizada através do ensaio de consistência por espalhamento, permite constatar que a crescente utilização de metacaulino nas argamassas conduz a menores valores de espalhamento.

Pela caracterização das argamassas no estado endurecido, realizada através de ensaios mecânicos (módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração por flexão e à compressão) e físicos (determinação da absorção de água por capilaridade, determinação da secagem, da porosidade aberta, da condutibilidade térmica e da resistência aos sulfatos), verifica-se que as argamassas submetidas a uma cura marítima apresentam, independentemente da percentagem de metacaulino utilizada, menor deformabilidade (maiores valores de módulo elasticidade) e maiores resistências mecânicas que as argamassas sujeitas a uma cura standard.

No que se refere à influência da incorporação de metacaulino em substituição parcial de cal, constata-se que as argamassas sem Mk possuem, de um modo geral, valores de módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas inferiores aos registrados para argamassas que tenham na sua constituição Mk. Observa-se, independentemente do tipo de cura, um acréscimo das características mecânicas com a crescente presença da pozolana, até aos 10% de substituição de massa de cal por Mk, todavia as argamassas com maior percentagem de metacaulino não deram continuidade a esse aumento. É possível identificar as argamassas com 10% de substituição de massa de cal por metacaulino como as mais resistentes e menos deformáveis.

Relativamente à evolução das características mecânicas com a idade, todas as argamassas possuem valores de módulo de elasticidade e resistência mecânicas com tendência para decrescer, contudo, verifica-se um acréscimo na resistência à tração dos 90 para os 180 dias nas argamassas com maiores teores de metacaulino (10% e 20%).

O ensaio de determinação da porosidade aberta não permitiu concluir qual a cura mais favorável, uma vez que as argamassas sujeitas a cura marítima apresentam valores de Pab e MVA semelhantes aos obtidos para uma cura standard. Os valores de Pab decrescem tendencialmente com a idade, contrariamente aos valores de MVA que apresentam tendência para crescer. Em idades mais jovens (28 dias) verifica-se uma diminuição de Pab e um aumento de MVA à medida que aumenta do teor em Mk, enquanto que em idades mais avançadas (90 e 180 dias) sucede-se o contrário, já que se verifica uma subida de Pab e uma diminuição de MVA com o aumento do teor em Mk.

Para avaliar o comportamento face à água foram realizados os ensaios de absorção de água por capilaridade e secagem. Em termos gerais a velocidade de absorção capilar inicial, expressa pelo coeficiente de capilaridade, não evidenciou diferenças de comportamento entre curas, no entanto, comprova-se um decréscimo de CC com a crescente presença de pozolana, até aos 10% de substituição de massa de cal por metacaulino. É possível identificar as argamassas com 10% de metacaulino como as que apresentam uma absorção de água inicial mais lenta, menores valores de CC, estando do lado oposto as argamassas sem metacaulino que registam os maiores valores de CC.

No que se refere à quantidade total de água absorvida, expressa pelo valor assintótico, não foi possível concluir qual a cura mais favorável, uma vez que as argamassas sujeitas aos dois tipos de cura revelam valores de VA semelhantes. Relativamente à influência da inclusão de metacaulino em substituição da cal, constata-se que as argamassas sem Mk são as mais favoráveis, registando uma menor quantidade total de água absorvida, encontrando-se na situação oposta as argamassas com 20% de Mk, o que leva a concluir que a crescente utilização de Mk proporciona um ligeiro aumento dos valores de VA.

Em termos de capacidade de secagem obtiveram-se valores de IS e TS semelhantes em ambas as curas, não se evidenciando qual a cura mais favorável, nem qual a percentagem de metacaulino que apresenta melhores características de secagem. Com a idade, todas as argamassas apresentam valores IS com tendência para decrescer e valores de TS com tendência para crescer, à excepção das argamassas sem Mk que não demonstram um padrão de evolução de IS definido.

O ensaio de resistência face ao ataque de sulfatos demonstrou uma diferença de comportamento entre as argamassas sem Mk e as restantes, com Mk. A incorporação de metacaulino em substituição parcial de cal apresenta melhorias no comportamento das argamassas face a este ataque, porém esta melhoria não é directamente proporcional ao aumento do teor em pozolana. É possível identificar as argamassas com 5% e 10% de Mk como as que apresentam o melhor comportamento ao longo do ensaio, contudo as argamassas com 10% de Mk apresentam, a idades mais jovens, perdas de massa consideráveis. Este ensaio permite também constatar que as argamassas submetidas a uma cura marítima assinalam, independentemente da percentagem de metacaulino utilizada, maiores resistências aos ciclos de sulfatos (menores perdas de massa) que as argamassas sujeitas a cura standard.

Em relação à aplicação das argamassas estudadas para o uso em edifícios antigos, é possível concluir que devido aos elevados valores de CC obtidos no presente estudo, nenhuma argamassa cumpre os requisitos definidos por Veiga [VEIGA, 2010]. No entanto, analisando somente as características mecânicas, constata-se que as argamassas sujeitas a cura marítima, assim como a argamassa NHL5_10Mk_S, revelam características adequadas para ser usadas em rebocos, contudo nenhuma argamassa apresenta características adequadas para ser utilizada no refechamento de juntas. Face aos requisitos da norma EN 998-1 [CEN, 2010] é possível concluir que, à excepção da argamassa NHL5_0Mk_S, todas as outras são adequadas para utilização em rebocos.

Ao analisar a globalidade dos resultados, tendo em conta a influência do teor em metacaulino, da cura e da idade, conclui-se que a cura marítima provoca uma melhoria das características mecânicas das argamassas e que a crescente utilização de metacaulino promove um acréscimo dessas características, sendo a argamassa com 10% de substituição de massa de cal por Mk a que apresenta o melhor comportamento. Relativamente ao comportamento face à água, de um modo geral as argamassas com menores teores de metacaulino, 5% e 10%, são as que apresentam um melhor comportamento.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Na realização de trabalhos futuros, que podem dar continuidade à investigação desenvolvida no presente estudo, considera-se pertinente:

- Caracterizar as argamassas a idades de cura mais avançadas (1 ano);
- Realizar outros tipos de ensaios, nomeadamente ensaios de porosimetria, de permeabilidade ao vapor de água e de aderência;
- Avaliar o comportamento destas argamassas com um traço volumétrico mais forte (talvez o traço 1:2 seja mais adequado);
- Avaliar o comportamento destas argamassas com a adição de outro tipo de pozolanas;
- Realizar ensaios químicos, mineralógicos e microestruturais, de modo a justificar alguns resultados apresentados;
- Caracterizar argamassas de cal hidráulica NHL5 produzidas após a entrada em vigor da norma NP EN 459-1:2011, de maneira a comparar com os resultados obtidos no presente estudo;
- Avaliar o comportamento destas argamassa quando sujeitas a ambientes de humidade relativa mais elevada;
- Utilizar água do mar para a realização do ensaio de resistência aos sulfatos, de maneira a simular um ataque mais real.

Referências Bibliográficas

- AICCOPN (2011). *Relatório e Contas 2011*, AICCOPN – Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas.
- 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.
- AGOSTINHO, C. (2008). *Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal aérea*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.
- 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, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- BOTAS, S. (2009). *Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- BRITO, V. (2009). *Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa. (FCT-UNL)
- 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.
- CARNEIRO, J (2012). *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- CARVALHO, R. (2012). *Reabilitação Urbana*. Suplemento do Diário Económico nº 5550, 13 de Novembro de 2012.
- CAVACO, L. (2005). *Técnicas de aplicação de argamassas de revestimento em edifícios antigos. Influência no desempenho*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.
- CEN (1998/2006). EN 1015-2:1998/A1:2006 - Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars. Brussels.
- CEN (1999/2006). 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 (1999/2004/2006). EN 1015-3:1999/A1:2004/A2:2006 - Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table): Brussels.
- CEN (2002). EN 1015-18:2002 - Methods of test for mortar for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels.
- CEN (2009). EN 15801:2009 - Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capilarity. Brussels.

- CEN (2010). EN 998-1 – Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar. Brussels.
- COELHO, A. Z.; JALALI, S. & TORGAL, F. P. *Desempenho comparado entre argamassas comerciais para a reabilitação e argamassas de cal aérea e metacaulino*. 3º Congresso Português de Argamassas de Construção, LNEC, Lisboa, 2010.
- CÓIAS, V. (2012). *Construção: Os excessos e o futuro*. GECORPA - Grémio do Património, Lisboa.
- CORREIA, F. N. (2009). *Sessão de Abertura*. Reabilitação Urbana, Sessão pública para Apresentação do novo Regime Jurídico, Auditório do LNEC, Lisboa, 29 de Junho.
- COUTINHO, J. (1999). *Materiais de Construção 1: Agregados para argamassas e betões*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- COUTINHO, J. S. (2006). *Materiais de Construção 2, 1ª Parte - Ligantes e caldas*. Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- COUTO, A. & COUTO, J. (2007). *Especificidades e Exigências Das Argamassas Na Reabilitação de Edifícios Antigos*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa (CD).
- DIAS, J. F.; TORGAL, F. P. & JALALI, S. (2011). *Desenvolvimento de argamassas para reabilitação de edifícios antigos Parte 2 - Comportamento à água*. Revista Engenharia Civil - Universidade do Minho, nº 39, págs. 59 - 68.
- FARIA, P. (2004). Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- FARIA, M. P. (2009). *Resistance to salts of lime and pozzolan mortars. Repair mortars for Historic Masonry*. RILEM Publications. Delft, The Netherlands, págs. 99-110.
- FARIA, P. (2011). PROJECTO FCTMETACAL - Procedimentos de ensaio de argamassas. Departamento Engenharia. Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- FARIA, P. (2012). *Argamassas Sustentáveis*. 2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- FARIA, P.; SILVA, V. & FLORES-COLEN, I. (2012) – *Argamassas de cal hidráulica natural e pozolanas artificiais: avaliação laboratorial*. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra (CD).
- FELGUEIRAS, N. (2011). *Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino sujeitas a ambientes de diferente humidade relativa*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- GAMEIRO, A.; SANTOS SILVA, A.; VEIGA, R.; VELOSA, A. & FARIA, P. (2012). *Evolução das Reações em Argamassas de Cal Aérea e Metacaulino – Projecto METACAL*. Jornadas LNEC,

- Engenharia para a Sociedade, Investigação e Inovação, Cidades e Desenvolvimento, LNEC, Lisboa, 18-20 Junho
- GLEIZE, P.; CYER, M. & ESCADEILLAS, G. (2007). *Effects of Metakaolin on Autogenous Shrinkage of Cement Pastes*. *Cement and Concrete Composites*, volume 29, 2ª edição - Fevereiro 2007, págs. 80-87.
- GRILO, J. (2013). *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL3,5 de fabrico nacional*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- HENRIQUES, F. & FARIA, P. (2008). *O papel da investigação no estudo das argamassas de substituição na conservação do património*. *Revista Engenharia Civil - Universidade do Minho*, nº 31, págs. 29 - 37.
- IPQ (2000). NP EN 933-1:2000. Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração, Monte da Caparica.
- IPQ (2001). NP EN 12370:2001 - Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à cristalização de sais. Almada, IPQ.
- IPQ (2002). 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: 2008 - Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. Almada, IPQ.
- IPQ (2010). NP 4220: 2010 - Pozolanas para betão, argamassas e caldas. Definições, requisitos e verificação da conformidade. Almada, IPQ.
- IPQ (2011). NP EN 459-1 - Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. Almada, IPQ.
- ISO 3310-1:2000. Test Sieves - Technical requirements testing - Part 1: Test Sieves of metal wire cloth. Switzerland.
- LANAS, J.; SIRERA, R.; ALVAREZ, J. I. (2005). *Study of the mechanical behavior of masonry repair lime-based cured and exposed under different conditions*. *Cement and Concrete*, nº 36, 2006, págs. 961-970.
- MAGALHÃES, A. C. & VEIGA, R. (2005). *Estudo comparativo de possíveis soluções de argamassas para revestimentos de paredes de edifícios antigos*. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa, 24 e 25 de Novembro de 2005.
- MARGALHA, M. G., VEIGA, M. R., & BRITO, J. (2007). *Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, 22 e 23 de Novembro de 2007, Lisboa. APFAC (CD).
- MARGALHA, M. (2011). *Argamassas - Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Património*. Universidade de Évora.

- MARTINS, A. (2010). *A influência das condições de cura em argamassas de cais aéreas com e sem adição de metacaulino*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Setúbal.
- MARTINS, J. G. & ASSUNÇÃO, J. S. (2010). *Materiais de Construção: Argamassas e Rebocos*. Universidade Fernando Pessoa, Série Materiais, 3ª edição 2010.
- MASSENA, R. (2011). *Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino em exposição natural*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- MIRANDA, L. (2009). *Estudo comparativo entre argamassa de revestimento à base de cimento com adição da cal hidráulica e da cal hidratada*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- PENAS, F. E. (2008). *Argamassa de cal hidráulica para revestimentos de paredes*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico -Universidade Técnica de Lisboa.
- PEREIRA, C.; MARTINS, A.; FARIA, P. & FANGUEIRO, R. (2012). *Avaliação da introdução de resíduo da indústria têxtil em argamassas*. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Auditório da Reitoria da Universidade de Coimbra (no Pólo I), 29 e 30 de Março de 2012, Coimbra.
- PIRES, C. M. & BRAGANÇA, L. (2011). *Reabilitação urbana sustentável: Reabilitação e conservação do património habitacional edificado*. Sustentabilidade na reabilitação urbana – O novo paradigma do mercado da construção. Conferência Nacional de 2011 (CD).
- RATO, V. (2006). *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Doutoramento em Engenharia Civil na especialidade de Reabilitação do Património Edificado, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- 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, págs. 205 - 207, Paris.
- RODRIGUES, D. (2010). *Influência dos métodos de ensaio nas características de argamassas de cal aérea e hidráulica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- RUSKULIS, O. (2002). *Pozzolanas: An Introduction. Practical Action, The Schumacher Centre for Technology and Development, UK*.
- 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*. 43º Congresso Brasileiro do Concreto. Paraná
- SEQUEIRA, A.; FRADE, D. & GONÇALVES, P. (2007). *Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa (CD)
- SEQUEIRA, C.; SANTOS A. S.; FRADE D. & GONÇALVES P. (2012). *Análise de diferentes ligantes na formulação de argamassas industriais de reabilitação*. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, APFAC, Auditório da Reitoria da Universidade de Coimbra, Coimbra (CD).

- SIDDIQUE, R. & KLAUS, J. (2009). *Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review*. Applied Clay Science, volume 43, págs.392-400. Elsevier.
- VEIGA, R. & CARVALHO, F. (1994). *Argamassas de revestimento na reabilitação do património urbano*. 2º Encore, Encontro sobre conservação e reabilitação de edifícios, Lisboa.
- VEIGA, R. (2003a). *As argamassas na conservação*. Actas das 1ªs Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Colecção Comunicações, LNEC, Lisboa.
- VEIGA, R. (2003b). *Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes*. Actas do 3º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. LNEC, Lisboa, Maio de 2003.
- VEIGA, R. & AGUIAR J. (2003). *Definição de estratégias de intervenção em revestimentos de edifícios antigos*. 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Porto, FEUP, 18 e 19 de Março de 2003 (CD).
- VEIGA, R. (2005). *Comportamento de rebocos para edifícios antigos: Exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos*. Seminário “Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos”. Lisboa, LNEC, 14 - 15 de Fevereiro de 2005 (CD)
- VEIGA, R. (2010). *Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings*. International Journal of Architectural Heritage, nº 4, págs.177-195.
- 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.
- VELOSA, A.; VEIGA, M. R. (2007). *Lime-metakaolin mortars - properties and applications*. In Portugal SB07: Sustainable Construction. Materials and Practices. Challenges of the Industry for the New Millennium, Lisboa, IST, Setembro de 2007 (CD).

ANEXOS

Anexo 1 – Ficha técnica da cal hidráulica NHL5



1. DESCRIPTION

Secil NATURAL LIME NHL 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 5 is classified as NHL 5 according to the NP EN 459-1:2010.

Secil NATURAL LIME NHL 5 is a unique binder. Besides featuring hydraulic properties it also suffers a carbonation process...

2. FIELD OF APPLICATION

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

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

In different civil engineering uses, such as, soil treatment

3. PRODUCT CHARACTERISTICS

Physical Characteristics	Value	Standard
Color	Beige	-
Specific mass (kg/dm ³)	0,65 ± 0,05	EN 459-1
Density (g/cm ³)	2,7	-
Fineness %	90 µm ≤ 15,0 200 µm ≤ 5,0	EN 459-1
Blaine (cm ² /g)	9400	-
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 ≤ 15,0

Mechanical Characteristics	Value	Standard
Mechanical Compressive strength 7 days (MPa)	≥ 2,0	EN 459-1
Mechanical Compressive Strength 28 days (MPa)	≥ 5,0 e ≤ 15	EN 459-1

Chemical Characteristics	Value	Standard
Sulphates (SO ₄) (%)	≤ 2,00	EN 459-1
Free Lime (Ca(OH) ₂) (%)	≥ 15,00	EN 459-1

4. PRODUCTION OF MORTARS

The dosage of Secil NATURAL LIME NHL 5 in a mortar must be adequate for the intended final use. In rendering and layering mortars Secil NATURAL LIME NHL 5, has an important role as only binder or mixed with others.

Previously mix Secil NATURAL LIME NHL 5 with the aggregate and afterwards add water in the necessary amount in order to obtain a good workability.

For your orientation, in what concerns mix ratios, we advise consultation of our chart in chapter 5 of this document.

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 5

NHL 5 - NATURAL HYDRAULIC LIME



Lime kilns



Bag Filters



Burnt limestone

Complementary Advice

- ▶ The excess of mixing water is prejudicial to the physical properties of the render;
- ▶ Always use the minimum quantity necessary to ensure a good workability of the mortar;
- ▶ The mixing water must be free from any impurities (clay, organic material), whenever possible, potable water must be used;
- ▶ Once the mixing ratio is determined for a specific mortar, keep the dosages and mixing times constant.

Restrictions

Do not apply mortars to temperatures below 5°C and above 30°C, always avoiding applications under strong winds or high solar exposure.

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

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.

6. SOIL TREATMENT

The addition of Secil Natural Lime to certain deep clay and humid soils allow their stabilization, improving their resistance by reducing the plasticity index and increasing compactiveness, thus increasing the CBR (California Bearing Ratio, support capacity index).

The addition of Secil Natural Lime reduces the soil humidity contributing for the agglutination of its particles and creating a much more compact agglomerate.

5. RECOMMENDED TRACES / RATIOS

Recommended Mortar Ratios /Traces	Raw Materials (by volume)			Compressive Strength (MPa)		Elasticity Module (MPa)
	NHL 5	Flow sand (< 0,2 mm)	Flow sand (< 0,42 mm)	7 days	28 days	28 days
Masonry Mortar (sand:binder) = (2:1)	1,0	1,0	1,0	1,8	3,4	10100
Render Mortar (sand:binder) = (3:1)	1,0	1,5	1,5	0,5	1,3	5700
Render Mortar (sand:binder) = (4:1)	1,0	2,0	2,0	0,4	0,5	3100
Screed Mortar (sand:binder) = (3:1)	1,0	-	3,0	1,0	1,8	8300

Obs: These values are merely orientative, obtained in laboratory testings. A utilização de agregados de diferentes origens ou características devem ser previamente ensaiados

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.
Customer Support: Apartado 2 | 2405 - 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 5

NHL 5 - NATURAL HYDRAULIC LIME

Application Proceps

The quantity of Secil NATURAL LIME NHL 5 to be used must be between 0,5 and 5 % (being 3% the typical value) of the soil mass to be treated, from which all stones of large dimensions must be withdrawn.

Start with spreading Secil NATURAL LIME NHL 5, mixing and homogenizing it with the soil in treatment. Afterwards, compact the treated soil, increasing the resistance to rainwater penetration and making it more apt to work as a foundation base.

These procedures are well documented on video files, at www.secilmartinganca.pt. You may also request copies of these files from our Commercial Services.

7. HIGIENE AND SAFETY

(DOES NOT DISMISS CONSULTATION OF THE PRODUCT SAFETY FILE)

- ▶ May cause skin irritation;
- ▶ May cause damage to eyes;
- ▶ May cause respiratory irritation;
- ▶ Keep away from children;
- ▶ Use protective gloves/ garments/ eye protection/ face protection;

- ▶ If in contact with eyes: wash carefully with water for several minutes. Immediately contact the Anti-Venom Information Center or a physician;
- ▶ If in contact with skin: wash abundantly with water and soap;
- ▶ Do not inhale powder or vapours;
- ▶ If inhaled: Remove victim to fresh air and keep at rest in a position comfortable for breathing;
- ▶ Disposal of content / packaging according to legislation in force.

Validity

Secil NATURAL LIME NHL 5 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 time period.

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.077.0

8. PACKAGING AND VALIDITY

Packaging

- ▶ 25 kg paper bags on plastic pallets.
- ▶ In bulk for use in silo systems



DESIGNATION: Secil NATURAL LIME NHL 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 nº 2003/CEP.2132

Secil Martingança, S.A.
Customer Support: Apartado 2 | 3406 - 909 - Maçosa - LRA - Portugal
Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilmartinganca.pt



www.secilmartinganca.pt

Anexo 2 – Ficha técnica do metacaulino

ARGICAL-M 1200S



PRODUCT DEFINITION

Caractéristiques produit

ARGICAL-M 1200S is an artificial pozzolana (metakaolin). It is obtained by calcining and micronising 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 matériau amorphe, non cristallisé, dont les particules présentent une forme lamellaire

PRODUCT USE / Domaine d'utilisation

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

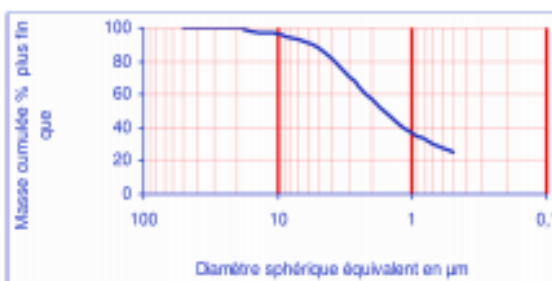
TYPICAL PHYSICAL CHARACTERISTICS

Caractéristiques physiques moyennes

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
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

PARTICLE SIZE DISTRIBUTION / Distribution granulométrique

Refus à 63 µm : 0,2 % ; d50 = 1,3 µm



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.



AGS
F-17270 Clérac
Tel. : +33 (0)5 46 04 17 11
Fax. : +33 (0)5 46 04 21 05
www.ags-mineraux.com
commercial@ags-mineraux.com

Revision 5 – 2009/10/15



Anexo 3 – Resultados individuais do Espalhamento

Quadro 3.1 – Espalhamento de cada argamassa

Argamassa	Volume de água (ml)	Tempo de juntar água (s)	Espalhamento (mm)				Média Espalhamento (mm)	Espalhamento Médio (mm)	Desvio Padrão
NLH5_0MK	950	18	160	155	161	164	160	159	1
		21	160	153	158	160	158		
		27	156	170	156	158	160		
NLH5_5MK	950	20	165	163	164	165	164	159	4
		22	157	155	154	156	156		
		26	160	158	158	157	158		
NLH5_10MK	950	22	159	157	159	159	159	154	4
		23	150	154	156	155	154		
		27	152	147	151	152	151		
NLH5_20MK	950	20	147	147	150	147	148	147	1
		19	145	148	148	146	147		
		23	143	147	147	147	146		

Anexo 4 – Resultados individuais do módulo de elasticidade dinâmico

Quadro 4.1 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias

Identificação da Argamassa	Identificação Provete	Massa [g]	Ed [Mpa]												Ed Média prov. [Mpa]	DP [Mpa]	Ed Média argamassa [Mpa]	DP [Mpa]	
			E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁	E ₁₂					
NHL5_0Mk_M	R1	R1.1	474,095	833	1273	1744	2972	2959	2897	3028						2964,000	53,771	2906,500	99,518
		R1.2	473,709	2956	2981	2973	2995									2976,250	16,276		
		R1.3	477,263	2814	2780	2752	2771									2779,250	25,941		
NHL5_0Mk_S	R2	R2.1	474,778	1816	1841	1843	1851	7036	6808	6461	6582					1837,750	15,130	1748,917	89,917
		R2.2	472,809	1805	1676	1681	1847	4687	6573	6598	6583	6962				1752,250	86,892		
		R2.3	473,039	1659	1656	1655	1657	6601	6730	6526	6621					1656,750	1,708		
NHL5_5Mk_M	R3	R3.1	475,035	2717	2736	2724	2698	6642								2718,750	15,903	2891,077	121,568
		R3.2	472,693	2948	2965	2948	2950	3030	6605							2968,200	35,273		
		R3.3	475,666	2966	2971	2964	2967									2967,000	2,944		
NHL5_5Mk_S	R4	R4.1	469,770	1587	1560	1557	1565	1683	1772	6445	6505	6429	6480			1620,667	88,038	1692,286	111,687
		R4.2	467,971	1669	1673	1638	1635	6435	6429	6587	6559					1653,750	20,023		
		R4.3	467,786	1827	1834	1845	1847	7212	7228	7253	7225					1838,250	9,430		
NHL5_10Mk_M	R5	R5.1	481,384	935	998	1024	830	3905	3938	3954	3913					3927,500	22,576	4041,917	92,934
		R5.2	473,696	192	825	882	900	4084	4130	4193	4034					4110,250	67,678		
		R5.3	474,633	728	697	558	621	4085	4078	4093	4096					4088,000	8,124		
NHL5_10Mk_S	R6	R6.1	466,354	459	806	787	789	3047	3049	3019	3058					3043,250	16,860	2656,125	322,667
		R6.2	460,571	754	768	771	758	2425	2427	2433	2437					2430,500	5,508		
		R6.3	466,080	764	781	784	784	2322	2209	2874	2876	2861	2872	2285	2304	2575,375	317,470		
NHL5_20Mk_M	R7	R7.1	479,981	2569	2527	2534	2531	2536	5575	5465	5531	5493	10228	10238	10246	2539,400	16,891	2568,538	62,404
		R7.2	474,337	2640	2633	2690	2654	10397	10269	10274	10301					2654,250	25,382		
		R7.3	470,677	2526	2529	2515	2507	5081								2519,250	10,145		
NHL5_20Mk_S	R8	R8.1	466,005	2100	2109	2119	2178	8234	8241	8230	8248					2126,500	35,199	2218,417	80,354
		R8.2	465,164	2222	2201	2203	2277	8442	8468	8462	8470					2225,750	35,453		
		R8.3	459,595	2317	2286	2290	2319	8473	8479	8470	8468					2303,000	17,416		

xxxxx Gama de valores considerados

Quadro 4.2 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias

Identificação da Argamassa	Identificação Provete	Massa [g]	Ed [Mpa]								Ed Média prov. [Mpa]	DP [Mpa]	Ed Média argamassa [Mpa]	DP [Mpa]	
			E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈					
NHL5_0Mk_M	R1	R1.4	476,098	2008	2050	1996	2003	7579	7557	7575	7581	2014,250	24,336	2050,667	119,846
		R1.5	471,774	1873	1963	1987	1984	7240	7326	7418	7317	1951,750	53,575		
		R1.6	468,913	2316	2085	2137	2206	7988	8034	7957	7986	2186,000	99,837		
NHL5_0Mk_S	R2	R2.4	470,066	1537	1544	1548	1554	5882	5868	5870	5879	1545,750	7,136	1530,000	47,645
		R2.5	475,439	1563	1542	1606	1571	5869	5856	5818	5830	1570,500	26,640		
		R2.6	471,670	1436	1503	1487	1469	5423	5418	5407	5406	1473,750	28,745		
NHL5_5Mk_M	R3	R3.4	474,990	2066	2081	2102	2021	7913	7903	7918	7893	2067,500	34,337	2079,167	33,790
		R3.5	479,996	2061	2104	2087	2032	7744	7806	7835	7901	2071,000	31,443		
		R3.6	481,931	2069	2149	2083	2095	7952	7957	7931	7938	2099,000	34,986		
NHL5_5Mk_S	R4	R4.4	472,122	1651	1654	1664	1662	7584	7589	7521	7546	1657,750	6,238	1736,167	119,677
		R4.5	474,505	1654	1659	1647	1651	7030	7048	7017	7036	1652,750	5,058		
		R4.6	471,598	1895	1903	1889	1905	7002	7017	6998	7006	1898,000	7,394		
NHL5_10Mk_M	R5	R5.4	471,650	2366	2222	2341	2307	8647	8636	8609	8621	2309,000	62,838	2477,083	165,646
		R5.5	472,637	2651	2678	2704	2693	9101	9576	9443	10503	2681,500	22,956		
		R5.6	475,570	2439	2466	2461	2397	8922	9059	9037	9039	2440,750	31,436		
NHL5_10Mk_S	R6	R6.4	464,840	1853	1756	1781	1793	7506	7538	7551	7582	1795,750	41,161	2127,583	255,441
		R6.5	468,434	2268	2167	2264	2199	8684	8719	8734	8674	2224,500	49,696		
		R6.6	472,100	2405	2297	2366	2382	8928	8894	8930	8899	2362,500	46,508		
NHL5_20Mk_M	R7	R7.4	469,903	2144	2127	2149	2203	8534	8578	8511	8516	2155,750	32,877	2075,167	123,756
		R7.5	458,475	1908	1884	1936	1920	7511	7602	7459	7503	1912,000	21,909		
		R7.6	477,638	2116	2203	2145	2167	7973	7971	7954	7958	2157,750	36,691		
NHL5_20Mk_S	R8	R8.4	463,503	1657	1783	1689	1691	7047	7054	7025	7035	1705,000	54,283	1742,250	54,688
		R8.5	462,462	1716	1709	1720	1723	7295	7260	7277	7263	1717,000	6,055		
		R8.6	462,442	1799	1810	1796	1814	6960	6951	6948	6962	1804,750	8,617		

xxxx Gama de valores considerados

Quadro 4.3 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 180 dias

Identificação da Argamassa	Identificação Provete	Massa [g]	Ed [Mpa]								Ed Média prov. [Mpa]	DP [Mpa]	Ed Média argamassa [Mpa]	DP [Mpa]	
			E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈					
NHL5_0Mk_M	R1	R1.7	461,257	1945	1875	1918	1896	7032	6979	7005	7018	1908,500	30,006	1848,167	67,879
		R1.8	464,346	1743	1897	1853	1782	7086	6991	6980	7035	1818,750	69,245		
		R1.9	469,844	1762	1823	1781	1903	6810	6919	7014	6935	1817,250	62,591		
NHL5_0Mk_S	R2	R2.7	465,918	1298	1266	1281	1276	4975	4944	4946	4983	1280,250	13,376	1354,500	80,383
		R2.8	474,817	1439	1442	1413	1421	5390	5401	5383	5374	1428,750	14,009		
		R2.9	466,060	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
NHL5_5Mk_M	R3	R3.7	473,418	1920	1887	1931	1937	7218	7270	7245	7225	1918,750	22,307	1902,917	94,332
		R3.8	473,241	2032	1974	1988	2016	7527	7539	7480	7531	2002,500	26,300		
		R3.9	468,713	1776	1793	1781	1800	7603	7589	7609	7613	1787,500	10,970		
NHL5_5Mk_S	R4	R4.7	479,160	1528	1535	1501	1516	6224	6221	6243	6278	1520,000	14,900	1536,250	69,182
		R4.8	476,096	1487	1457	1473	1487	5899	5813	5862	5793	1476,000	14,283		
		R4.9	471,762	1681	1527	1632	1611	6041	6043	6062	6079	1612,750	64,251		
NHL5_10Mk_M	R5	R5.7	471,179	2110	2141	2089	2146	8054	8126	8031	8146	2121,500	26,889	2141,917	34,885
		R5.8	467,915	2174	2138	2190	2206	8408	8470	8462	8414	2177,000	29,098		
		R5.9	470,611	2099	2128	2146	2136	8458	8476	8390	8386	2127,250	20,222		
NHL5_10Mk_S	R6	R6.7	466,959	1776	1817	1838	1804	7004	6868	6915	6936	1808,750	25,941	1891,417	111,037
		R6.8	465,848	2036	2030	2041	2043	7574	7572	7526	7504	2037,500	5,802		
		R6.9	464,251	1838	1840	1771	1863	6946	6923	6911	7026	1828,000	39,657		
NHL5_20Mk_M	R7	R7.7	470,778	1948	2010	1967	1988	6929	6934	7020	6974	1978,250	26,738	2025,583	57,032
		R7.8	476,440	1999	2020	2014	2038	7504	7443	7428	7475	2017,750	16,132		
		R7.9	478,976	2147	2005	2060	2111	8187	8010	8026	7986	2080,750	61,841		
NHL5_20Mk_S	R8	R8.7	458,348	1689	1684	1690	1711	6770	6814	6829	6789	1693,500	11,958	1687,500	24,337
		R8.8	459,063	1651	1689	1647	1694	6599	6579	6616	6528	1670,250	24,676		
		R8.9	463,639	1659	1708	1702	1726	6861	6731	6814	6786	1698,750	28,395		

xxx Gama de valores considerados

Anexo 5 – Resultados individuais da resistência à tracção e à compressão

Quadro 5.1 – Resistências mecânicas aos 28 dias

Identificação da Argamassa		Identificação Provete	<i>F_t</i> [N]	<i>F_c</i> [N]	<i>R_t</i> <i>provete</i> [MPa]	<i>R_c</i> <i>provete</i> [MPa]	<i>R_{t arg}</i> [MPa]	<i>R_{c arg}</i> [MPa]	<i>DP R_t</i> [MPa]	<i>DP R_c</i> [MPa]
NHL5_0Mk_M	R1	R1.1	160,770	1166,800	0,377	0,729	0,356	0,654	0,025	0,197
		R1.2	140,260	688,070	0,329	0,430				
		R1.3	154,430	1283,260	0,362	0,802				
NHL5_0Mk_S	R2	R2.1	88,220	673,480	0,207	0,421	0,201	0,403	0,005	0,027
		R2.1	85,250	666,740	0,200	0,417				
		R2.3	84,000	594,620	0,197	0,372				
NHL5_5Mk_M	R3	R3.1	110,590	2097,320	0,259	1,311	0,291	1,199	0,038	0,220
		R3.2	119,720	2144,460	0,281	1,340				
		R3.3	142,270	1513,920	0,333	0,946				
NHL5_5Mk_S	R4	R4.1	83,770	1139,300	0,196	0,712	0,197	0,824	0,003	0,244
		R4.2	85,320	1050,060	0,200	0,656				
		R4.3	82,790	1765,070	0,194	1,103				
NHL5_10Mk_M	R5	R5.1	178,820	2573,810	0,419	1,609	0,419	1,817	0,030	0,444
		R5.2	191,580	2424,800	0,449	1,516				
		R5.3	166,000	3722,370	0,389	2,326				
NHL5_10Mk_S	R6	R6.1	154,030	2870,140	0,361	1,794	0,342	1,554	0,059	0,430
		R6.2	118,020	2897,360	0,277	1,811				
		R6.3	166,000	1692,390	0,389	1,058				
NHL5_20Mk_M	R7	R7.1	122,470	2342,300	0,287	1,464	0,311	1,409	0,021	0,117
		R7.2	139,770	2038,950	0,328	1,274				
		R7.3	135,240	2382,430	0,317	1,489				
NHL5_20Mk_S	R8	R8.1	96,050	1924,460	0,225	1,203	0,236	1,088	0,013	0,155
		R8.2	107,100	1459,480	0,251	0,912				
		R8.3	99,550	1837,470	0,233	1,148				

Quadro 5.2 – Resistências mecânicas aos 90 dias

Identificação da Argamassa		Identificação Provete	F_t [N]	F_c [N]	$R_{t\ provete}$ [MPa]	$R_{c\ provete}$ [MPa]	$R_{t\ arg}$ [MPa]	$R_{c\ arg}$ [MPa]	$DP\ R_t$ [MPa]	$DP\ R_c$ [MPa]
NHL5_0Mk_M	R1	R1.4	106,650	1050,810	0,250	0,657	0,251	0,598	0,016	0,052
		R1.5	100,674	932,030	0,236	0,583				
		R1.6	114,234	889,169	0,268	0,556				
NHL5_0Mk_S	R2	R2.4	60,823	-	0,143	-	0,149	0,349	0,025	0,039
		R2.5	75,542	601,740	0,177	0,376				
		R2.6	54,923	514,060	0,129	0,321				
NHL5_5Mk_M	R3	R3.4	108,983	1583,640	0,255	0,990	0,285	0,962	0,030	0,027
		R3.5	121,452	1535,175	0,285	0,959				
		R3.6	134,262	1498,476	0,315	0,937				
NHL5_5Mk_S	R4	R4.4	92,479	1409,392	0,217	0,881	0,210	0,824	0,019	0,061
		R4.5	80,714	1214,420	0,189	0,759				
		R4.6	95,911	1332,070	0,225	0,833				
NHL5_10Mk_M	R5	R5.4	108,233	1288,651	0,254	0,805	0,309	0,918	0,060	0,314
		R5.5	159,383	2036,350	0,374	1,273				
		R5.6	128,352	1081,869	0,301	0,676				
NHL5_10Mk_S	R6	R6.4	78,975	1598,770	0,185	0,999	0,232	1,240	0,044	0,236
		R6.5	101,333	2353,750	0,237	1,471				
		R6.6	116,212	2001,331	0,272	1,251				
NHL5_20Mk_M	R7	R7.4	128,806	1258,676	0,302	0,787	0,292	0,912	0,016	0,317
		R7.5	116,553	2036,350	0,273	1,273				
		R7.6	127,840	1081,869	0,300	0,676				
NHL5_20Mk_S	R8	R8.4	97,366	970,410	0,228	0,607	0,233	0,667	0,009	0,080
		R8.5	103,777	1210,771	0,243	0,757				
		R8.6	97,560	1018,314	0,229	0,636				

Quadro 5.3 – Resistências mecânicas aos 180 dias

Identificação da Argamassa		Identificação Provete	F_t [N]	F_c [N]	$R_{t\ provete}$ [MPa]	$R_{c\ provete}$ [MPa]	$R_{t\ arg}$ [MPa]	$R_{c\ arg}$ [MPa]	$DP\ R_t$ [MPa]	$DP\ R_c$ [MPa]
NHL5_0Mk_M	R1	R1.7	100,373	809,080	0,235	0,506	0,212	0,368	0,023	0,126
		R1.8	80,855	416,770	0,190	0,260				
		R1.9	90,716	538,451	0,213	0,337				
NHL5_0Mk_S	R2	R2.7	57,852	486,540	0,136	0,304	0,133	0,209	0,003	0,089
		R2.8	56,955	202,204	0,133	0,126				
		R2.9	55,265	315,432	0,130	0,197				
NHL5_5Mk_M	R3	R3.7	111,176	783,450	0,261	0,490	0,275	0,555	0,016	0,100
		R3.8	124,771	809,411	0,292	0,506				
		R3.9	116,158	1071,940	0,272	0,670				
NHL5_5Mk_S	R4	R4.7	114,989	773,870	0,270	0,484	0,269	0,494	0,003	0,204
		R4.8	113,764	473,480	0,267	0,296				
		R4.9	116,158	1125,506	0,272	0,703				
NHL5_10Mk_M	R5	R5.7	154,651	842,807	0,362	0,527	0,384	0,568	0,023	0,078
		R5.8	174,340	1052,269	0,409	0,658				
		R5.9	162,186	831,070	0,380	0,519				
NHL5_10Mk_S	R6	R6.7	147,082	636,650	0,345	0,398	0,340	0,460	0,055	0,209
		R6.8	167,338	1108,310	0,392	0,693				
		R6.9	120,607	462,899	0,283	0,289				
NHL5_20Mk_M	R7	R7.7	185,393	1165,183	0,435	0,728	0,471	0,516	0,032	0,184
		R7.8	207,725	652,192	0,487	0,408				
		R7.9	209,825	660,954	0,492	0,413				
NHL5_20Mk_S	R8	R8.7	154,630	646,901	0,362	0,404	0,358	0,532	0,011	0,271
		R8.8	155,910	557,463	0,365	0,348				
		R8.9	147,172	1348,689	0,345	0,843				

Anexo 6 – Resultados individuais da porosidade aberta e massa volúmica aparente

Quadro 6.1 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente aos 28 dias

Identif. Argamassa		Identif. Proverte	Massa			Pab prov. [%]	Pab [%]	Pab arg [%]	DP [%]	MVA prov. [kg/m ³]	MVA arg [kg/m ³]	DP [kg/m ³]
			M ₁	M ₂	M ₃							
NHL5_0Mk_M	R1	R1.1	60,451	36,155	71,623	31,499	25,120	28	4,1	1704,381	1636	108
		R1.2	60,152	36,016	71,540	32,057	25,717			1693,278		
		R1.3	30,353	17,939	38,025	38,196	32,509			1511,152		
NHL5_0Mk_S	R2	R2.1	47,142	28,244	57,287	34,931	28,847	29	0,3	1623,179	1627	4
		R2.2	56,228	33,622	68,199	34,621	28,505			1626,168		
		R2.3	51,776	30,964	62,724	34,471	28,340			1630,227		
NHL5_5Mk_M	R3	R3.1	57,548	34,106	68,753	32,340	26,022	25	1,1	1660,981	1683	26
		R3.2	63,208	37,655	74,595	30,826	24,404			1711,099		
		R3.3	65,468	38,232	77,300	30,286	23,834			1675,745		
NHL5_5Mk_S	R4	R4.1	61,995	36,649	73,649	31,497	25,118	25	0,9	1675,541	1680	13
		R4.2	67,297	39,974	79,669	31,168	24,767			1695,352		
		R4.3	58,425	34,927	69,901	32,813	26,531			1670,527		
NHL5_10Mk_M	R5	R5.1	54,682	32,410	65,620	32,936	26,664	26	1,1	1646,552	1679	39
		R5.2	88,103	52,768	103,939	30,947	24,533			1721,737		
		R5.3	52,981	31,463	63,215	32,231	25,904			1668,588		
NHL5_10Mk_S	R6	R6.1	64,717	38,634	76,771	31,607	25,235	25	0,0	1696,961	1687	10
		R6.2	62,047	36,914	73,689	31,657	25,289			1687,206		
		R6.3	50,145	29,714	59,615	31,671	25,304			1677,034		
NHL5_20Mk_M	R7	R7.1	71,416	42,323	84,181	30,496	24,056	24	1,4	1706,149	1722	24
		R7.2	59,781	35,379	69,536	28,559	22,034			1750,183		
		R7.3	58,386	34,871	69,014	31,128	24,725			1710,043		
NHL5_20Mk_S	R8	R8.1	68,550	40,168	80,657	29,902	23,431	24	0,9	1693,052	1707	14
		R8.2	55,145	32,890	65,227	31,178	24,778			1705,322		
		R8.3	62,963	37,158	73,736	29,452	22,961			1721,335		

Quadro 6.2 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente aos 90 dias

Identif. Argamassa	Identif. Provete	Massa			Pab prov.	Pab	Pab arg	DP	MVA prov.	MVA arg	DP	
		[g]										
		M ₁	M ₂	M ₃	[%]	[%]	[%]	[%]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	
NHL5_0Mk_M	R1	R1.4	57,095	34,462	65,079	26,077	19,511	20	0,3	1864,814	1858	13
		R1.5	51,249	30,787	58,596	26,420	19,854			1842,893		
		R1.6	59,456	35,812	67,682	25,811	19,245			1865,579		
NHL5_0Mk_S	R2	R2.4	Provetes partiram-se									
		R2.5										
		R2.6										
NHL5_5Mk_M	R3	R3.4	72,320	43,955	83,326	27,955	21,412	21	0,2	1836,885	1843	6
		R3.5	63,527	38,711	73,093	27,823	21,277			1847,682		
		R3.6	57,795	35,093	66,410	27,509	20,957			1845,483		
NHL5_5Mk_S	R4	R4.4	66,472	40,171	75,702	25,977	19,411	20	0,4	1870,817	1866	5
		R4.5	47,705	28,848	54,465	26,389	19,823			1862,240		
		R4.6	54,288	32,949	62,071	26,725	20,162			1864,158		
NHL5_10Mk_M	R5	R5.4	71,014	43,119	81,390	27,112	20,553	21	0,4	1855,556	1849	7
		R5.5	41,685	25,419	47,972	27,877	21,333			1848,313		
		R5.6	61,148	37,172	70,372	27,783	21,237			1841,807		
NHL5_10Mk_S	R6	R6.4	62,575	36,973	70,604	23,874	17,338	20	2,0	1860,635	1854	9
		R6.5	62,998	38,183	72,337	27,344	20,789			1844,528		
		R6.6	65,691	39,969	75,327	27,253	20,696			1857,882		
NHL5_20Mk_M	R7	R7.4	63,025	38,076	72,602	27,739	21,191	21	0,2	1825,436	1822	3
		R7.5	63,891	38,455	73,520	27,460	20,908			1822,073		
		R7.6	66,430	39,965	76,474	27,511	20,959			1819,551		
NHL5_20Mk_S	R8	R8.4	59,129	35,923	68,131	27,950	21,407	21	0,4	1835,848	1836	7
		R8.5	69,290	41,923	79,528	27,225	20,668			1842,574		
		R8.6	59,717	36,070	68,710	27,552	21,001			1829,565		

Quadro 6.3 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente aos 180 dias

Identif. Argamassa		Identif. Provete	Massa			Pab prov.	Pab	Pab arg	DP	MVA prov.	MVA arg	DP
			[g]									
			M ₁	M ₂	M ₃							
NHL5_0Mk_M	R1	R1.7	62,813	37,150	70,815	23,769	17,236	18	0,9	1865,825	1876	9
		R1.8	62,763	37,638	71,011	24,715	18,159			1880,652		
		R1.9	61,172	36,972	69,494	25,589	19,024			1880,942		
NHL5_0Mk_S	R2	R2.7	55,892	Provetes partiram-se								
		R2.8	45,889									
		R2.9	65,475									
NHL5_5Mk_M	R3	R3.7	48,022	29,267	55,011	27,148	20,590	19	1,9	1865,367	1892	36
		R3.8	50,437	30,462	56,554	23,444	16,921			1933,045		
		R3.9	63,942	38,886	72,936	26,414	19,849			1877,885		
NHL5_5Mk_S	R4	R4.7	57,539	35,013	65,474	26,050	19,483	19	0,2	1888,940	1886	6
		R4.8	59,669	36,140	67,906	25,930	19,364			1878,392		
		R4.9	63,344	38,414	71,941	25,642	19,077			1889,343		
NHL5_10Mk_M	R5	R5.7	46,019	27,981	52,819	27,377	20,823	21	0,2	1852,766	1850	9
		R5.8	54,850	33,118	62,927	27,096	20,537			1840,048		
		R5.9	45,347	27,613	52,021	27,343	20,789			1857,874		
NHL5_10Mk_S	R6	R6.7	55,911	33,941	64,006	26,925	20,364	21	0,2	1859,671	1850	10
		R6.8	70,194	42,516	80,433	27,004	20,444			1851,254		
		R6.9	43,469	26,307	49,941	27,384	20,830			1839,257		
NHL5_20Mk_M	R7	R7.7	52,790	31,829	61,174	28,570	22,046	21	0,8	1798,944	1819	27
		R7.8	66,339	39,855	76,564	27,854	21,310			1807,159		
		R7.9	61,999	37,564	71,081	27,097	20,538			1849,778		
NHL5_20Mk_S	R8	R8.7	57,287	34,419	65,902	27,364	20,809	22	0,8	1819,617	1807	13
		R8.8	54,982	33,202	63,846	28,926	22,413			1794,217		
		R8.9	57,047	34,402	65,950	28,220	21,685			1808,260		

Anexo 7 – Resultados individuais da resistência aos sulfatos

Quadro 7.1 – Variações de massa no ensaio de resistência aos sulfatos aos 28 dias

Ciclo:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
NHL5_0Mk_M	R1	0,24%	4,28%	0,45%	0,75%	0,88%	0,30%	0,18%	-0,35%	-0,82%	-1,19%	-1,72%	-2,64%	-3,33%	-4,21%	-5,07%	-6,08%	-7,03%	-8,51%	-9,85%	-11,99%
NHL5_0Mk_S	R2	0,20%	6,31%	0,34%	0,58%	0,66%	-0,04%	-0,78%	-1,95%	-2,74%	-4,77%	-7,34%	-9,41%	-12,42%	-13,94%	-15,84%	-17,31%	-19,23%	-21,73%	-23,58%	-27,29%
NHL5_5Mk_M	R3	0,30%	6,83%	0,39%	0,73%	1,04%	1,02%	1,16%	1,14%	1,15%	1,10%	0,98%	0,77%	0,63%	0,42%	0,16%	-0,04%	-0,20%	-0,52%	-0,89%	-1,40%
NHL5_5Mk_S	R4	0,25%	8,74%	0,35%	0,71%	1,04%	1,02%	1,10%	1,00%	1,06%	1,06%	0,96%	0,23%	-0,04%	-0,43%	-0,81%	-1,23%	-1,60%	-2,06%	-2,54%	-3,32%
NHL5_10Mk_M	R5	0,35%	7,91%	0,44%	0,81%	1,16%	1,38%	1,62%	1,62%	1,58%	1,44%	1,06%	0,60%	-16,03%	-29,79%	-30,57%	-31,07%	-31,57%	-32,33%	-33,01%	-34,13%
NHL5_10Mk_S	R6	0,27%	6,35%	0,39%	0,73%	1,06%	1,21%	1,38%	1,16%	1,05%	0,88%	0,58%	0,17%	-0,16%	-14,50%	-15,03%	-27,81%	-28,25%	-28,79%	-29,50%	-37,63%
NHL5_20Mk_M	R7	0,32%	5,57%	0,56%	0,93%	1,33%	1,41%	1,66%	1,69%	1,75%	1,72%	1,47%	0,15%	-0,78%	-2,21%	-3,18%	-4,60%	-6,37%	-8,20%	-10,45%	-13,05%
NHL5_20Mk_S	R8	0,27%	2,73%	0,55%	0,89%	1,20%	1,22%	1,36%	1,37%	1,50%	1,58%	1,24%	-0,71%	-2,25%	-3,37%	-4,47%	-5,78%	-7,31%	-8,72%	-10,14%	-12,44%

Quadro 7.2 – Variações de massa no ensaio de resistência aos sulfatos aos 90 dias

Ciclo:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
NHL5_0Mk_M	R1	0,06%	0,13%	0,18%	0,16%	-0,26%	-0,41%	-0,54%	-0,59%	-0,95%	-1,39%	-2,01%	-2,68%	-3,41%	-4,29%	-5,16%	-6,57%	-10,24%	-12,54%	-15,33%	-18,53%
NHL5_0Mk_S	R2	-11,49%	-13,84%	-15,02%	-16,79%	-18,98%	-20,08%	-21,57%	-23,45%	-25,15%	-27,03%	-29,57%	-31,58%	-33,12%	-34,30%	-35,90%	-37,55%	-39,25%	-41,32%	-43,91%	-46,24%
NHL5_5Mk_M	R3	0,13%	0,23%	0,36%	0,46%	0,31%	0,44%	0,52%	0,73%	0,93%	1,04%	1,16%	1,13%	1,03%	0,87%	0,70%	0,45%	0,19%	-0,08%	-0,19%	-0,33%
NHL5_5Mk_S	R4	0,10%	0,22%	0,33%	0,32%	0,12%	0,25%	0,33%	0,50%	0,66%	0,72%	0,77%	0,70%	0,57%	0,29%	0,50%	-0,11%	-0,45%	-0,76%	-1,01%	-1,57%
NHL5_10Mk_M	R5	0,13%	0,24%	0,37%	0,51%	0,42%	0,59%	0,70%	0,93%	1,15%	1,27%	1,43%	1,48%	1,31%	1,27%	1,19%	1,12%	0,99%	0,72%	0,70%	0,50%
NHL5_10Mk_S	R6	0,12%	0,24%	0,46%	0,50%	0,35%	0,51%	0,56%	0,72%	0,85%	0,87%	0,91%	0,84%	0,66%	0,42%	0,13%	-0,14%	-0,57%	-1,00%	-1,15%	-1,65%
NHL5_20Mk_M	R7	0,12%	0,26%	0,56%	0,56%	0,40%	0,56%	0,70%	0,90%	1,12%	1,19%	1,21%	1,14%	0,97%	0,76%	0,49%	0,10%	-0,30%	-0,76%	-1,29%	-1,92%
NHL5_20Mk_S	R8	0,07%	0,12%	0,16%	0,16%	-0,10%	-0,32%	-0,88%	-1,76%	-2,95%	-4,10%	-5,34%	-6,68%	-8,49%	-9,86%	-14,18%	-16,45%	-18,56%	-21,37%	-24,54%	-28,49%

Quadro 7.3 – Variações de massa no ensaio de resistência aos sulfatos aos 180 dias

Ciclo:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
NHL5_0Mk_M	R1	0,12%	0,06%	0,17%	0,19%	0,01%	-0,31%	-1,20%	-4,62%	-12,09%	-14,15%	-19,66%	-40,12%	-42,82%	-48,01%	-53,29%	-56,80%	-62,92%	-72,83%	-73,44%	-74,26%
NHL5_0Mk_S	R2	-4,64%	-16,53%	-29,98%	-31,73%	-35,91%	-38,26%	-42,29%	-47,19%	-52,23%	-55,87%	-67,47%	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-100,00%
NHL5_5Mk_M	R3	0,06%	0,29%	0,56%	0,84%	1,08%	1,30%	1,48%	1,64%	1,77%	1,85%	1,92%	2,00%	1,92%	1,91%	1,93%	1,79%	1,56%	1,32%	0,90%	0,51%
NHL5_5Mk_S	R4	0,11%	0,29%	0,49%	0,71%	0,84%	0,95%	0,89%	0,84%	0,72%	0,54%	0,30%	0,03%	-0,42%	-0,77%	-1,25%	-2,07%	-2,69%	-3,57%	-4,69%	-5,90%
NHL5_10Mk_M	R5	0,16%	0,27%	0,55%	0,87%	1,11%	1,35%	1,54%	1,67%	1,81%	1,93%	1,98%	2,03%	1,99%	2,05%	2,14%	2,04%	1,97%	1,87%	1,74%	1,54%
NHL5_10Mk_S	R6	0,29%	0,31%	0,67%	0,75%	0,90%	1,06%	1,04%	0,95%	0,68%	0,52%	0,10%	-0,30%	-0,77%	-1,37%	-2,03%	-3,16%	-4,36%	-6,09%	-8,44%	-11,57%
NHL5_20Mk_M	R7	0,31%	0,36%	0,89%	0,89%	1,10%	1,28%	1,37%	1,31%	1,24%	1,00%	0,78%	0,48%	-0,34%	-1,61%	-3,00%	-5,69%	-9,78%	-14,09%	-19,08%	-25,20%
NHL5_20Mk_S	R8	0,48%	-6,10%	-6,30%	-6,32%	-6,79%	-7,20%	-7,76%	-9,12%	-10,60%	-11,79%	-14,18%	-17,09%	-19,53%	-23,62%	-28,97%	-48,49%	-68,00%	-84,11%	-87,86%	-92,14%