



**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**

**ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL

**A resistência mecânica e a porosidade das  
argamassas bastardas com baixo teor de cimento**

**Cátia Isabel Proença Ramalho**

Orientação: Doutora Maria Goreti Lopes Batista Margalha

Doutora Maria do Rosário da Silva Veiga

**Mestrado em Engenharia Civil**

Área de especialização: *Construção*

Dissertação

Évora, 2013





**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**

**ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL

**A resistência mecânica e a porosidade das  
argamassas bastardas com baixo teor de cimento**

**Cátia Isabel Proença Ramalho**

Orientação: Doutora Maria Goreti Lopes Batista Margalha

Doutora Maria do Rosário da Silva Veiga

**Mestrado em Engenharia Civil**

Área de especialização: *Construção*

Dissertação

Évora, 2013



# Sumário

## A resistência mecânica e a porosidade das argamassas bastardas com baixo teor de cimento

Atualmente é frequente utilizar as argamassas bastardas de cal aérea e cimento para reparar rebocos de edifícios antigos. O principal objetivo deste trabalho é contribuir para o desenvolvimento do conhecimento sobre a influência da adição de cimento nas argamassas à base de cal aérea.

Esta investigação teve como objetivo estudar e comparar o comportamento de várias argamassas bastardas de cal aérea com pequenas adições de cimento Portland, com base num trabalho laboratorial.

Para tal, foram estudadas sete argamassas com igual traço volumétrico (1:2) e consistência medida pelo espalhamento semelhante.

A substituição da cal por cimento variou de 0% a 30%. A relação água/ligante (em massa) das argamassas preparadas foi estabelecida de forma a garantir uma consistência de espalhamento de  $145 \pm 1$  mm. Estas foram objeto de caracterização no estado fresco e endurecido. No estado fresco consistiu na determinação da consistência e da massa volúmica. A caracterização no estado endurecido foi elaborada a nível mecânico, com os ensaios de módulo de elasticidade, resistências à flexão e à compressão, e a nível físico, com os ensaios de capilaridade, permeabilidade ao vapor de água, massa volúmica, porosidade aberta, carbonatação e envelhecimento acelerado.

Palavras-chave: argamassa bastarda, cal aérea, cimento.



# Abstract

## The mechanical strength and porosity of bastard mortars with low cement content

Currently it is common to use the mixed mortar lime and cement for repairing the plaster of old buildings. The main aim of this work is to contribute to the development of the knowledge about the influence of the addition of cement to based-air lime mortars.

This research aimed to study and compare the behavior of several bastard air lime mortars with small additions of Portland cement, based on laboratory work.

Therefore, seven mortars were studied with the same volumetric trace (1:2) and a similar consistency.

The substitution of lime for cement varies from 0% to 30%. The relation water/binder of the mortars, which were prepared, was established to ensure a consistency of  $145\pm 1$  mm per spreading. These were studied in both states, fresh and hardened. In the fresh state it consisted in determining the consistency and density. The characterization, in the hardened state, was elaborated at a mechanical level through tests of modulus of elasticity, bending resilience, and compression resilience. At a physical level, with tests to capillarity, water vapor permeability, volume mass, open porosity, carbonation and accelerated aging.

Key-words: Mixed mortars, aerial lime, cement.





# Agradecimentos

Esta dissertação é o culminar de uma vida académica repleta de alegrias e bons momentos vividos. Deste modo, quero assinalar o meu agradecimento:

À Professora Doutora Maria Goreti Lopes Batista Margalha pela sua orientação e partilha de conhecimento, pelo seu incentivo, estímulo e constante acompanhamento ao longo da realização deste trabalho.

À Investigadora Principal Maria do Rosário da Silva Veiga do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pela sua co-orientação e à qual agradeço a disponibilidade e auxílio prestados no trabalho desenvolvido e por ter proporcionado meios e recursos para a execução deste trabalho dentro do LNEC.

Aos técnicos de experimentação presentes no Núcleo de Revestimentos e Isolamentos (NRI) pelo seu acompanhamento e importante contributo nos ensaios efetuados, pela boa disposição e excelente ambiente de trabalho que proporcionaram, Ana Maria Francisco, Bento Sabala e Luís Carmo.

Aos amigos da Universidade pelos bons momentos passados juntos na diversão, no convívio e no estudo.

À minha irmã Ana Paula e cunhado Victor Batista pela estadia em Lisboa, pelo apoio, incentivos e muita ajuda ao longo deste meu percurso.

Por fim, aos meus queridos Pais, Fátima Ramalho e Manuel Ramalho por todos os sacrifícios e mais alguns que fizeram e fazem por quererem dar um futuro a uma filha. Pela sua teimosia e perseverança em não desistirem de lutar.

Pelo seu incondicional amor. Sem vós não teria sido possível.



# Índice

Sumário .....	i
Abstract .....	iii
Agradecimentos .....	v
Índice .....	vii
Índice de figuras .....	ix
Índice de tabelas .....	xi
Índice de gráficos .....	xii
I - Introdução .....	1
I.1 - Considerações Gerais .....	1
I.2 - Objetivo .....	1
I.3 - Estrutura da dissertação .....	2
II – Argamassas .....	4
II.1 - Breve história das argamassas .....	4
II.2 - Argamassas bastardas .....	5
II.2.1 - Ligantes .....	5
II.2.2 - Agregados .....	12
II.2.3 - Água .....	13
II.3 – Características recomendadas das argamassas de substituição de rebocos .....	14
III - Descrição do programa experimental e dos métodos de ensaio .....	20
III.1 - Descrição geral .....	20
III.2 - Constituintes das Argamassas .....	23
III.2.1 - Ligantes .....	23
III.2.2 - Agregado .....	24
III.2.3 - Água .....	24
IV - Procedimentos utilizados nos ensaios .....	26
IV.1 - Descrição geral .....	26
IV.2 - Caracterização da Matéria-prima .....	27
IV.2.1 - Análise granulométrica da areia .....	27
IV.2.2 - Volume de vazios da areia .....	27
IV.2.3 - Massa volúmica aparente dos materiais .....	28

IV.3 - Preparação das argamassas.....	29
IV.4 - Ensaio em estado fresco.....	30
IV.4.1 - Consistência por espalhamento.....	30
IV.4.2 - Massa volúmica da argamassa em pasta.....	31
IV.4.3 - Preparação dos provetes.....	32
IV.5 - Ensaio em estado endurecido.....	34
IV.5.1 - Absorção de água por capilaridade e secagem.....	34
IV.5.2 - Módulo de elasticidade dinâmico.....	36
IV.5.3 - Resistência à flexão e à compressão.....	37
IV.5.4 - Carbonatação.....	39
IV.5.5 - Porosidade aberta e massa volúmica.....	39
IV.5.7 - Permeabilidade ao vapor de água.....	41
IV.5.8 - Envelhecimento artificial.....	42
V - Apresentação e análise de resultados.....	45
V.1 - Considerações gerais.....	45
V.2 - Caracterização dos Constituintes das Argamassas.....	46
V.2.1 - Granulometria da areia.....	46
V.2.2 - Volume de vazios da areia.....	47
V.2.3 - Ligantes.....	47
V.2.4 - Massa volúmica aparente dos materiais.....	47
V.3 - Caracterização das Argamassas no Estado Fresco.....	48
V.4 - Avaliação das características no estado endurecido.....	51
V.4.1. Avaliação das Características Mecânicas.....	51
V.4.2 - Avaliação das Características Físicas das Argamassas.....	56
VI - Conclusão e desenvolvimentos futuros.....	71
VI.1. Considerações e conclusões gerais.....	71
VI.2. Propostas para Desenvolvimento Futuro.....	74
Bibliografia.....	76
Anexos	
1. Ficha técnica dos ligantes	
2. Areia	
2.1. Análise granulométrica da areia	
2.2. Ficha técnica do agregado	

# Índice de figuras

Figura 1: História das argamassas - Linha do tempo (APFAC, 2008).....	5
Figura 2: Classificação dos ligantes .....	6
Figura 3: Ciclo produtivo da cal aérea (Lusical, 2011).....	8
Figura 4: Esquema das transformações sofridas pelo cru até se transformar em clínquer (Coutinho, 2002) .....	9
Figura 5: Processo de produção do cimento (Secil, 2011) .....	11
Figura 6: Metodologia de obtenção de provetes para os ensaios .....	23
Figura 7: CL 90 .....	23
Figura 8: CEM II/B-L 32,5N .....	23
Figura 9: Areia de rio .....	24
Figura 10: Balança .....	26
Figura 11: Início do ensaio - volume igual de areia e água .....	28
Figura 12: Fim do ensaio - areia saturado e volume de água gasta .....	28
Figura 13: Início do ensaio da baridade da areia .....	29
Figura 14: Fim do ensaio de baridade da cal.....	29
Figura 15: Junção de água na misturadora .....	29
Figura 16: Mistura dos materiais.....	29
Figura 17: Raspagem das paredes e fundo da cuba com a pá de pedreiro .....	30
Figura 18: Messa de espalhamento .....	30
Figura 19: Inserção da argamassa no tronco-cônico.....	30
Figura 20: Compactação da argamassa.....	31
Figura 21: Ensaio da consistência por espalhamento .....	31
Figura 22: Medição da consistência por espalhamento .....	31
Figura 23: Molde metálico .....	32
Figura 24: Enchimento do molde metálico .....	32
Figura 25: Material usado para a preparação dos provetes prismáticos.....	32
Figura 26: Molde prismático preenchido com a argamassa .....	32
Figura 27: Molde para os provetes cilíndricos .....	33
Figura 28: Preparação para a elaboração dos moldes para o revestimento em tijolos .....	34
Figura 29: Molde em tijolo preenchido.....	34

Figura 30: Ensaio de absorção de água por capilaridade .....	35
Figura 31: Secagem dos provetes.....	36
Figura 32: Determinação da frequência de ressonância.....	36
Figura 33: Equipamento de medição da resistência à flexão e compressão .....	37
Figura 34: Pesagem dos provetes .....	37
Figura 35: Determinação da resistência à flexão .....	38
Figura 36: Determinação da resistência à compressão .....	38
Figura 37: Ensaio de carbonatação aos 90 dias de idade.....	39
Figura 38: Decorrer do ensaio da porosidade aberta .....	40
Figura 39: Pesagem submersa dos provetes.....	40
Figura 40: Material usado para a preparação do ensaio de permeabilidade ao vapor de água.....	41
Figura 41: Câmara de envelhecimento e a decorrer a primeira etapa do primeiro e segundo ciclo do ensaio .....	42
Figura 42: Arca frigorífica e a decorrer a segunda etapa do primeiro ciclo do ensaio .....	43
Figura 43: Apresentação da carbonatação de todas as argamassas aos 90 dias de idade .....	66
Figura 44: Argamassa E (20% de cimento) aos 210 dias de idade .....	67
Figura 45: Apresentação da carbonatação das restantes argamassas aos 210 dias de idade .....	67
Figura 46: Início da degradação da argamassa A na 4ª repetição do 2º ciclo .....	68
Figura 47: Início da degradação da argamassa A na 7ª repetição do 2º ciclo .....	68
Figura 48: Identificação e caracterização das patologias após o ensaio de envelhecimento..	68

# Índice de tabelas

Tabela 1: Recomendações estabelecidas para características mecânicas (Veiga, 2003) .....	17
Tabela 2: Recomendações estabelecidas para características de comportamento à água e ao clima (Veiga, 2003) .....	17
Tabela 3: Composição ponderal.....	21
Tabela 4: Composição das argamassas .....	21
Tabela 5: Traço volumétrico das argamassas (cal: cimento: areia) .....	45
Tabela 6: Quantidades utilizadas (g) .....	46
Tabela 7: Baridade dos materiais .....	47
Tabela 8: Determinação da relação água/ligante (em massa) das argamassas.....	48
Tabela 9: Características das argamassas no estado fresco.....	49
Tabela 10: Características do recipiente utilizado no ensaio.....	50
Tabela 11: Resultados dos ensaios do módulo de elasticidade dinâmica, da resistência à flexão e compressão .....	52
Tabela 12: Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28, 90 e 210 dias .....	57
Tabela 13: Resultados do ensaio de secagem.....	60
Tabela 14: Permeabilidade ao vapor de água e espessura da camada de ar de difusão equivalente.....	63
Tabela 15: Massa Volúmica real ( $MV_{real}$ ), Massa volúmica aparente ( $MV_{ap.}$ ) e porosidade aberta ( $P_{ab}$ ).....	64
Tabela 16: Percentagem de carbonatação dos provetes aos 90 e 210 dias de idade .....	66

# Índice de gráficos

Gráfico 1: Componentes do clínquer (Lima, 2009) .....	10
Gráfico 2: Relação água/ligante (em massa) para a obtenção de um espalhamento de $145\pm 1$ mm <sup>2</sup> .....	
Gráfico 3: Curva granulométrica da areia utilizada.....	46
Gráfico 4: Quantidade de água necessária para atingir o espalhamento pretendido para cada argamassa .....	49
Gráfico 5: Relação entre a relação água/ligante (em massa) e o teor em cimento das argamassas	50
Gráfico 6: Relação entre a massa volúmica aparente e o teor em cimento das argamassas.....	51
Gráfico 7: Relação entre o valor médio da tensão de compressão e o teor em cimento das argamassas .....	53
Gráfico 8: Relação entre o valor médio da tensão de flexão e o teor em cimento das argamassas	54
Gráfico 9: Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o teor em cimento das argamassas	55
Gráfico 10: Coeficiente de absorção de água por capilaridade aos 28, 90 e 210 dias.....	58
Gráfico 11: Representação dos resultados obtidos no ensaio de capilaridade para as argamassas aos 28 dias.....	58
Gráfico 12: Representação dos resultados obtidos no ensaio de capilaridade para as argamassas aos 90 dias.....	59
Gráfico 13: Representação dos resultados obtidos no ensaio de capilaridade para as argamassas aos 210 dias.....	59
Gráfico 14: Índice inicial do processo de secagem aos 28, 90 e 210 dias .....	60
Gráfico 15: Relação entre o teor em água e o tempo de secagem das argamassas aos 28 dias.....	61
Gráfico 16: Relação entre o teor em água e o tempo de secagem das argamassas aos 90 dias.....	61
Gráfico 17: Relação entre o teor em água e o tempo de secagem das argamassas aos 210 dias...	62
Gráfico 18: Permeabilidade ao vapor de água aos 90 dias de idade .....	63
Gráfico 19: Espessura da camada de ar de difusão equivalente.....	63
Gráfico 20: Porosidade aberta .....	65
Gráfico 21: Massa volúmica aparente.....	65
Gráfico 22: Carbonatação dos provetes aos 90 e 210 dias de idade .....	67





# I - Introdução

No presente capítulo são apresentadas as considerações gerais, o objetivo da investigação e a estrutura da dissertação.

## I.1 - Considerações Gerais

A presente investigação teve por base trabalhos de natureza experimental, no sentido de complementar o conhecimento já adquirido relativamente às propriedades das argamassas bastardas, nomeadamente no que diz respeito à influência do ligante hidráulico.

Atualmente é frequente a utilização de argamassas bastardas de cal aérea e cimento Portland para a execução de reparações em rebocos de edifícios antigos. No entanto, a utilização do cimento em alvenarias antigas pode ter efeitos negativos, nomeadamente, pela alta resistência que apresentam, a baixa permeabilidade ao vapor de água e pela quantidade de sais que incorpora na sua composição.

Deste modo o incremento do conhecimento sobre este tipo de argamassas com baixo teor de cimento pode vir a ter reflexos positivos na seleção das formulações de argamassa a utilizar em casos reais, nomeadamente, em alvenarias com baixa resistência.

O estudo teve como objetivo a procura de um maior conhecimento sobre o desempenho deste tipo de argamassas nomeadamente no que respeita à sua composição e quantidade de ligante hidráulico adicionado. As diferentes percentagens dos ligantes adicionadas às pastas mantendo o traço atribuem às argamassas características distintas.

Procurou-se assim estudar e comparar o comportamento de várias argamassas bastardas de cal aérea com adição de cimento Portland em pequenas percentagens relativamente à quantidade de cal aérea adicionada, com base num trabalho laboratorial.

## I.2 - Objetivo

A presente dissertação tem como primeiro propósito estudar e comparar o comportamento de várias argamassas bastardas de cal aérea hidratada com adição de uma pequena percentagem de cimento Portland. Esta caracterização tem como objetivo avaliar a influência de adição de

cimento na argamassa e estudar a evolução das características físicas e mecânicas ao longo do tempo.

Este objetivo só pode ser alcançado depois de elaborados vários ensaios no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

A composição de argamassas bastardas com cal aérea e cimento já foi alvo de diversos estudos, havendo opiniões controversas em relação à adição de cimento mesmo em pequenas quantidades em argamassas de cal. Há quem considere esta adição um fator negativo por baixar a porosidade das argamassas e o seu efeito negativo na resistência a ciclos de gelo/degelo mas tendo o fator positivo de desenvolver a resistência mecânica da argamassa. (O'HARE, 1995) (HOLMSTROM, 1995) (MARTINEZ, et al., 2007)

As formulações estudadas foram objeto de caracterização no estado fresco e endurecido. A caracterização no estado fresco foi obtida através da determinação da consistência por espalhamento e da massa volúmica. A caracterização no estado endurecido foi efetuada aos 28, 90 e 210 dias de idade a nível mecânico e físico.

## I.3 - Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em 6 capítulos.

No primeiro capítulo faz-se um enquadramento do tema apresentando os principais objetivos e expondo a organização do texto.

No segundo capítulo, "Argamassas", faz-se uma breve história das argamassas, aborda-se os constituintes e requisitos das argamassas bastardas.

No terceiro capítulo apresenta-se a descrição do programa a ser executado e os métodos de ensaios a serem realizados.

O quarto capítulo expõe os procedimentos experimentais realizados, tanto através de texto como de figuras. A caracterização efetuada apoia-se na avaliação do desempenho mecânico e físico.

Segue-se o quinto capítulo onde se apresentam os resultados e se elabora uma breve discussão dos mesmos.

No sexto e último capítulo apresentam-se as conclusões gerais e perspetivas de desenvolvimento futuro neste domínio.



## II - Argamassas

No presente capítulo é apresentada uma breve história das argamassas, o seu conceito, os seus constituintes e os requisitos que têm de preencher.

### II.1 - Breve história das argamassas

A argamassa é um produto de construção muito antigo, que resulta da mistura de um ligante com um agregado, tendo como antecedentes produtos naturais como a pedra, a lama e a madeira, que terão sido dos primeiros materiais a serem usados pelo Homem.

O ligante utilizado nas argamassas mais antigas foi a cal aérea, que é um produto transformado quimicamente. Alguns investigadores supõem que esse tipo de material já teria sido observado pelo homem da idade da pedra, quando percebeu que as pedras de calcário e gesso próximas das fogueiras soltavam um pó devido à descarbonatação com a ação do fogo e que este endurecia com a hidratação do sereno da noite. (Sousa, 2011)(Sousa, 2011)

O mais antigo vestígio de utilização de argamassas remonta a cerca de 10.000 anos antes de Cristo, sendo este à base de cal e foi descoberto na Galileia. (European Mortar Industry Organisation, 2011)

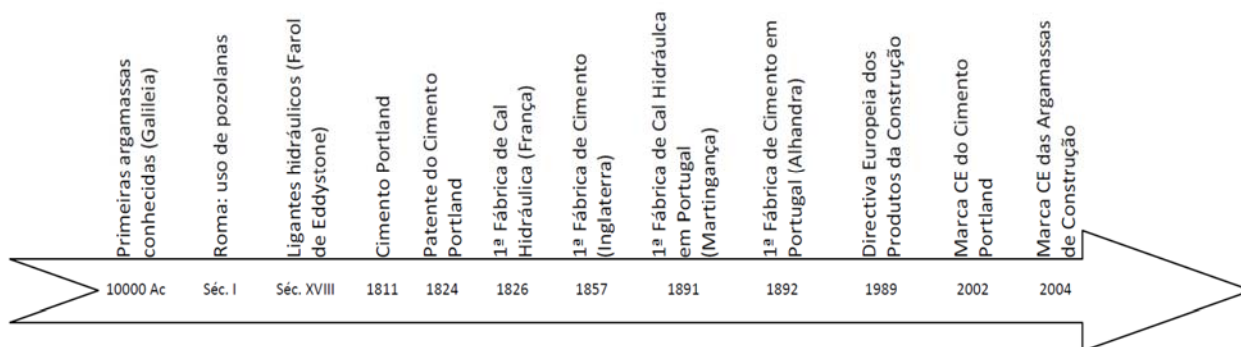
No Antigo Egipto é evidente a utilização de argamassas à base de cal e gesso na decoração das monumentais pirâmides. Os Assírios e Babilónios usaram a argila como material de ligação nas suas construções, enquanto os Gregos se serviam de terras vulcânicas para as suas obras de arquitetura. Os Romanos desenvolveram argamassas altamente duráveis, à base de areia, pedaços de telha, calcário calcinado e cinzas vulcânicas, a sua fórmula era um segredo muito importante e com a destruição do império, esta quase que desapareceu. (Vitrúvio, 1998) (Vitrúvio, 2006) (Margalha, 2010) (Sousa, 2011) (Secil, 2011). No entanto, com o desenvolvimento da ciência tem sido possível determinar a composição das argamassas antigas, tornando-se ainda difícil conhecer todos os processos de execução já que muitos fatores são determinantes na sua qualidade.

Só no século XVIII, a argamassa teve um novo desenvolvimento para que resistisse à ação de erosão da água do mar. Este desenvolvimento foi levado a cabo pelo engenheiro britânico John Smeaton para a construção do Farol de Eddystone, tendo utilizado cinzas vulcânicas provenientes da Itália. (Sousa, 2011)

Desde 1811, Joseph Aspdin dedicou-se à qualidade de um ligante hidráulico, conseguindo definir quantidades mais adequadas de matérias-primas. Estas seriam calcinadas em temperaturas mais elevadas do que até essa data e reduzidas a pó, conferindo assim uma maior qualidade. Este

produto tinha cor e características similares às das pedras da Ilha de Portland, assim, Aspdin apelidou o seu produto de Cimento Portland e patenteou este processo de fabrico em 1828. (Secil, 2011) (Ciplan, 2011)

Com o passar do tempo, o melhoramento da construção dos fornos permitiu que estes alcançassem temperaturas cada vez mais elevadas, podendo obter-se assim novos tipos de cimentos. Continuando a ser, tal como na altura de Aspdin, um processo de fabrico complexo, rigorosamente controlado e tendo uma diversidade de operações. O estudo das características do cimento continua a interessar investigadores que procuram desenvolver materiais de maior resistência e durabilidade. (Sousa, 2011) (Secil, 2011)



**Figura 1: História das argamassas - Linha do tempo (APFAC, 2008)**

## II.2 - Argamassas bastardas

Entende-se como argamassa bastarda uma argamassa composta por mais de um ligante, agregados e água. No caso da argamassa em estudo os ligantes são a cal aérea hidratada em pó e o cimento Portland, cujo ligante aéreo predominante é a cal e, o ligante hidráulico, o cimento.

Normalmente este tipo de argamassa é utilizado essencialmente em intervenções de edifícios antigos, mas em construções novas também tem vindo a ser utilizada porque melhora a plasticidade da pasta, com consequências favoráveis na aplicação e na fase de endurecimento.

### II.2.1 - Ligantes

Um ligante ou aglomerante é um material que tem a capacidade de aderir a outros materiais, agregados, como a areia. Um ligante, em contato com água forma uma pasta, a qual é moldável e maleável, permitindo o fácil manuseamento do material. Ao juntar areia a essa pasta forma-se

uma argamassa que depois de fazer presa se torna rígida e resistente. Se à argamassa se juntar brita está-se perante um material chamado betão. (Martins, et al., 2006)

Os ligantes vão influenciar, não só as propriedades, como o desempenho das argamassas.

A Figura 2 apresenta a classificação dos ligantes de forma esquemática:



Figura 2: Classificação dos ligantes

Os ligantes aéreos têm a capacidade de fazer presa e endurecer ao ar, enquanto os ligantes hidráulicos têm a propriedade de fazer presa, endurecer e manter resistência ao longo do tempo em contacto com a água ou ao ar.

Os ligantes usados neste trabalho foram a cal aérea, sob a forma de pó, e o cimento Portland.

### II.2.1.1 - Cal aérea

A cal aérea é definida segundo a norma NP EN 459-1:2002, como sendo constituída principalmente por óxidos ou hidróxidos de cálcio que, sendo misturados com água, endurecem lentamente ao ar por reação com o dióxido de carbono. Estes não possuem propriedades hidráulicas, logo não realizam presa debaixo de água. (Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2002)

#### II.2.1.1.1 - Classificação da cal

A matéria-prima da cal é a rocha calcária. A cal pode ser classificada de duas formas consoante a sua composição, cálcica (CL), ou magnésiana/dolomítica (DL). As cals cálcicas, CL90, CL80 e CL70, com percentagens de óxido de cálcio e óxido de magnésio superiores a 90%, 80% e 70%, respetivamente, têm percentagens de óxido de magnésio inferiores a 5%; nas cals dolomíticas,

DL85 e DL80 as percentagens de óxido de cálcio e de óxido de magnésio são superiores a 85% e 80%, respetivamente, sendo a percentagem de óxido de magnésio superior a 30% e 5%, respetivamente.

As impurezas mais frequentes nas rochas carbonatadas são a sílica, os óxidos de ferro e alumínio. Estas impurezas podem alterar as propriedades da cal produzida. (Agostinho, 2008) (Santos, 2009) (Margalha, 2010)

### II.2.1.1.2 - Ciclo da cal

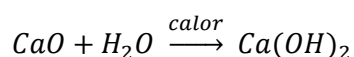
O processo de formação da cal aérea é visto sob a forma de ciclo, constituído por 3 fases distintas, sendo a calcinação, hidratação e carbonatação. (Agostinho, 2008) (Pavão, 2010)

A calcinação baseia-se em elevar a temperatura da rocha calcária a 900 °C, para que ocorra a decomposição do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), pela equação química seguinte (Agostinho, 2008) (Santos, 2009):



O óxido de cálcio também designado como cal viva é um produto sólido, de cor branca e quando em contacto com a água produz uma reação exotérmica, devendo por isso ser manuseado com cuidado. Como é um material instável não pode ser utilizado na construção sem antes ser hidratada ou extinta, sendo esta a 2ª fase do ciclo. (Agostinho, 2008) (Pavão, 2010)

A hidratação da cal viva, também denominada como extinção, resulta da junção de água (H<sub>2</sub>O) à cal viva (CaO), transformando-se em hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) segundo a seguinte equação:

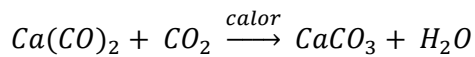


Como foi referido, este processo desencadeia uma reação exotérmica mas também uma reação muito expansiva, podendo chegar a aumentar três a quatro vezes o seu volume inicial de óxido de cálcio.

Este processo de hidratação pode ser efetuado por diferentes métodos, nomeadamente, aspersão, extinção espontânea, autoclaves, imersão e fusão, obtendo-se cal apagada em pó, no 1º e 2º método, e cal em pasta de boa qualidade nos restantes métodos. (Agostinho, 2008) (Santos, 2009) (Pavão, 2010)

A cal hidratada carbonata em contacto com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente na atmosfera, este processo fecha o ciclo da cal. Esta reação transforma o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) em carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e água (H<sub>2</sub>O) e há libertação de calor, segundo a seguinte reação:





Este processo é lento e ocorre do exterior para o interior, precisando que a argamassa tenha uma certa porosidade de modo a permitir a evaporação de água e penetração de dióxido de carbono. Este processo depende de vários fatores atmosférico em que ocorre, incluindo a humidade relativa, temperatura, a concentração de dióxido de carbono, a estrutura porosa e a espessura de cada camada. (Santos, 2009) (Pavão, 2010)

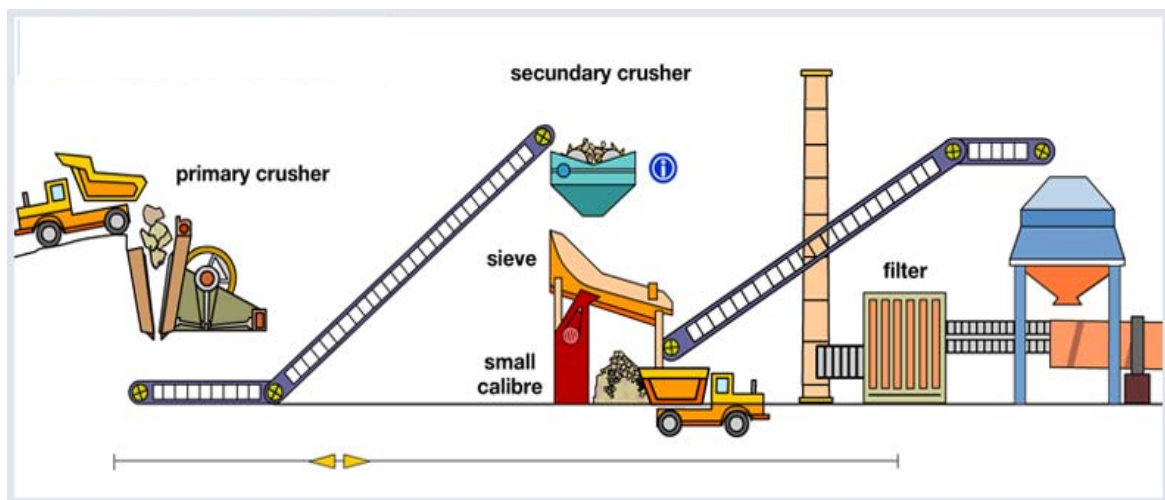


Figura 3: Ciclo produtivo da cal aérea (Lusical, 2011)

### II.2.1.2 - Cimento Portland

O cimento, cuja denominação deriva do latim *cæmentu*, é um material inorgânico que resulta da exploração das matérias-primas de uma pedreira, que contêm em determinadas proporções, cálcio, sílica, alumina e ferro, que depois passam por um britador. A seguir à fase da exploração da pedreira e da britagem do material existe uma moagem, denominada moagem de cru, que pretende reduzir as matérias a uma finura elevada. Depois da moagem de cru vem a operação de cozedura, através da qual surge, por reações químicas complexas, um produto granulado denominado clínquer. A etapa seguinte é a moagem de cimento. Por último vem a ensilagem, a embalagem e a expedição.

O cimento é um dos materiais de construção mais utilizados em várias fases da construção civil. O cimento pertence à classe dos materiais classificados como aglomerantes hidráulicos. Este tipo de material em contato com a água entra em processo físico-químico, tornando-se um elemento sólido com grande resistência à compressão e resistente a água e a sulfatos. (NP EN 197-1, 2001) (Martins, 2008) (Lima, 2009)

## II.2.1.2.1 - Composição da matéria-prima

O cimento Portland é obtido a partir de uma mistura devidamente proporcionada de calcário (carbonato de cálcio), margas ou argila e, eventualmente, outras substâncias apropriadas ricas em sílica, alumina ou ferro, que compõem o “cru”. Este depois é sujeito a temperaturas da ordem dos 1450°C em que as matérias-primas reagem entre si originando novos compostos, chamados de clínquer, como se mostra na Figura 4. (Coutinho, 2002) (Martins, 2008)

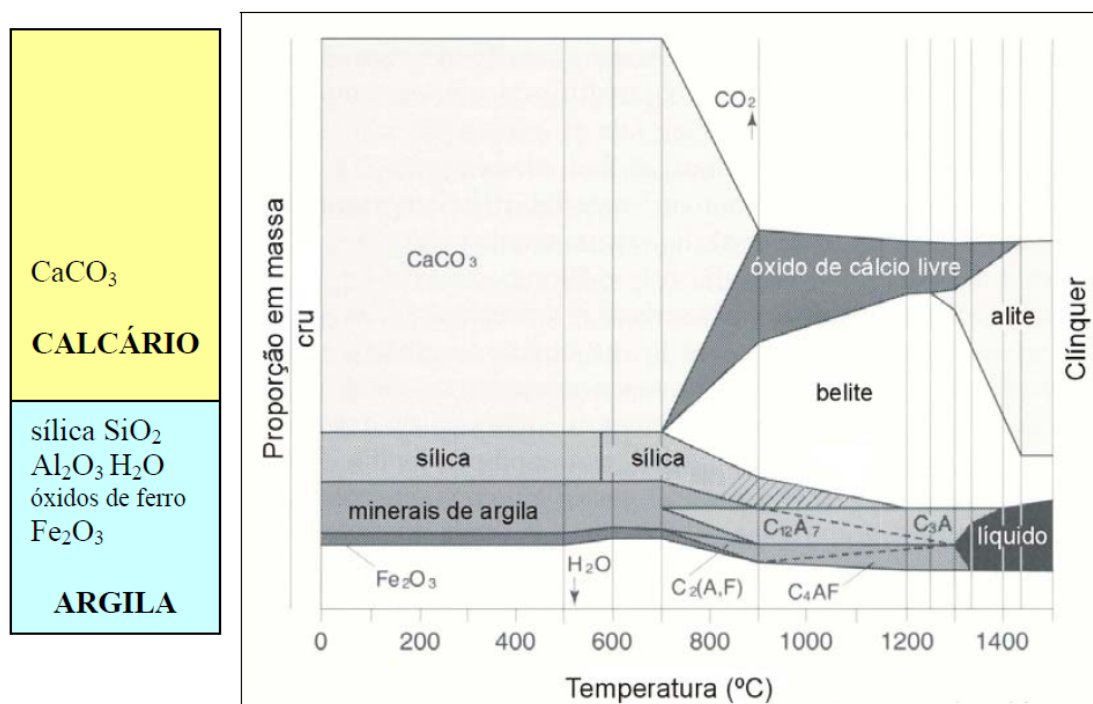
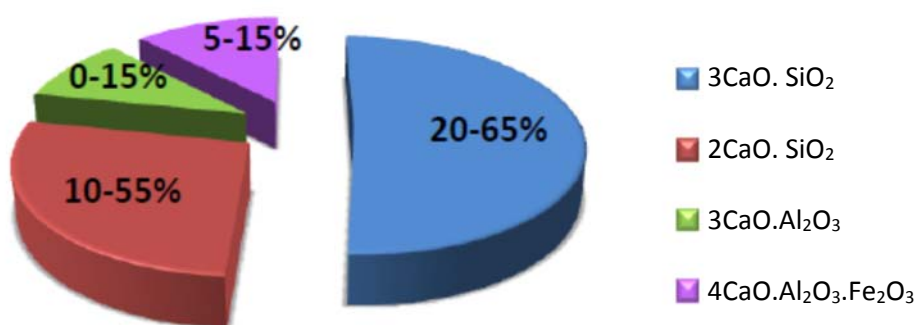


Figura 4: Esquema das transformações sofridas pelo cru até se transformar em clínquer (Coutinho, 2002)

A transformação das matérias-primas devido à temperatura leva à formação dos componentes principais do clínquer, expostos a seguir, com indicação da percentagem em que normalmente ocorrem:

Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
Aluminoferrato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$



**Gráfico 1: Componentes do clínquer (Lima, 2009)**

Os diversos tipos de cimento são compostos de clínquer e de adições que os distinguem, conferindo diferentes propriedades mecânicas e químicas a cada um. Consoante a distribuição geográfica e as características da principal matéria-prima, as adições também são ou não utilizadas.

#### II.2.1.2.2 - Processo de fabrico

Existem dois métodos para a fabricação do cimento, por via húmida e por via seca. O primeiro caiu em desuso por ser mais dispendiosa energeticamente, apesar de ser mais eficaz para a obtenção da homogeneização de materiais sólidos, mas foi substituído pelo segundo por ser menos exigente em termos energéticos, e este só se tornou possível devido às técnicas de fluidificação gasosa.

A matéria-prima (calcários, margas e argilas) é extraída das pedreiras, em blocos de dimensão máxima de 1,5m a 2m, depois é transportada para britadores, para estes a trabalharem de forma a reduzir a pequenos blocos apenas com alguns centímetros, recebe a adição de argila (aproximadamente 25% de argila e 75% de brita calcária) em seguida sofre uma pré-homogeneização. Posteriormente, por meio de moinho obtém-se o cru que é uma mistura finamente moída, em proporções bem definidas das matérias-primas. O cru é depois cozido em fornos, para que se desenvolva o processo de cozedura é necessário atingir temperaturas muito elevadas. Os fenómenos que acontecem durante este processo são os seguintes: (Coutinho, 2002) (Lima, 2009) (Margalha, 2010)

- evaporação da água livre, a temperaturas até 100 °C;
- desidratação das argilas, a cerca de 450 °C;
- início da decomposição dos carbonatos de cálcio e de magnésio, a temperaturas entre os 450 e 800 °C;
- cristalização dos minérios resultantes e a decomposição do carbonato, a cerca 900 °C;
- reações da cal com os silicatos e aluminatos entre os 900 °C e os 1200 °C;
- início da fusão, a temperaturas de 1200 °C a 1280 °C;
- acima dos 1280 °C, a formação dos compostos, referidos anteriormente, que constituem o clínquer, com clinquerização completa entre 1400 °C e 1450 °C;

O clínquer sai do forno ainda quente e em reação, sendo necessário arrefecê-lo rapidamente para conservar a sua estrutura. Depois do arrefecimento rápido o clínquer é armazenado até ficar à temperatura ambiente, de seguida ocorre a moagem, juntamente com adjuvantes e aditivos, para facilitar a moagem e regular o tempo de presa. Sabe-se que, para formar a argamassa, só a superfície do grão do cimento participa na reação, daí o interesse em se obter pó cada vez mais fino. Após a moagem, o cimento é armazenado em silos. (Coutinho, 2006)

Em todas as operações de fabrico, principalmente na moagem, é produzida uma enorme quantidade de pó; para evitar o seu espalhamento existem aparelhos coletores que aspiram o ar sobre as máquinas e o fazem passar por filtros especiais, retendo o pó. Atualmente existe outro processo para a colheita do pó que é feito por ionização do ar e do pó, em filtros eletrostáticos. (Coutinho, 2006)

Na Figura 5 está apresentado um diagrama do processo de fabrico do cimento desde a extração da matéria-prima das pedreiras até à fase da sua distribuição.

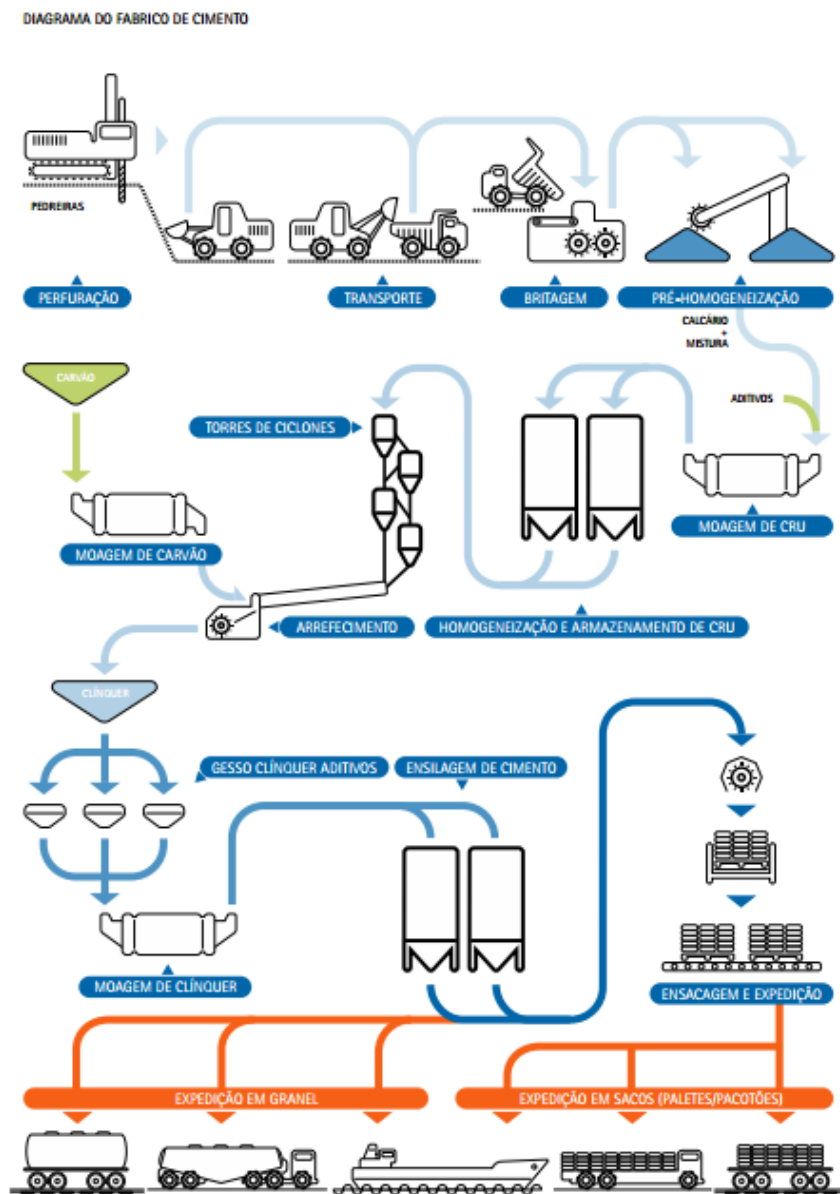


Figura 5: Processo de produção do cimento (Secil, 2011)

## II.2.2 - Agregados

Os agregados são constituintes praticamente inertes na formulação das argamassas. No entanto, apesar de não serem coesivos, têm um papel determinante na compacidade e retração das argamassas. A utilização de agregados com granulometria adequada contribui para o incremento da resistência mecânica e durabilidade das argamassas, bem como a possibilidade de obter soluções mais económicas dado que permite o recurso a menor dosagem de ligante. Note-se, que, para que esta contribuição seja eficaz, os agregados não devem conter sais ou matéria orgânica.

Os agregados podem ser classificados de diversas formas, nomeadamente tendo em atenção a origem, a dimensão das partículas e a sua massa volúmica. Deste modo, podemos ter agregados naturais ou artificiais, grossos ou finos, leves ou de elevada massa volúmica. No presente trabalho foram utilizados apenas agregados pétreos finos – areia. (Agostinho, 2008)

As areias são produtos da desagregação das rochas. Essa desagregação pode ser natural, quando provocada pela ação dos agentes atmosféricos, ou artificial por britagem.

As areias, quando naturais, acumulam-se em lugares chamados areais ou areeiros. A zona de Lisboa vulgarmente conhecida por Areeiro deve o seu nome ao facto de ter sido aí explorado um depósito de areias.

De um modo geral uma areia para argamassa ou betão, deve ser (Costa, 1999):

- pura;
- dura;
- áspera;
- ranger quando apertada na mão;
- não sujar as mãos nem conservar as marcas dos dedos;
- não turvar a água.

Os inimigos das argamassas ou betão provenientes da areia são:

- sal (quando a areia for marinha) provoca eflorescências;
- argila diminui a resistência;
- impurezas prejudica o endurecimento.

O modo de combater esses inimigos é por:

- lavagem com água, mas, ao aplicar-se, a areia deve estar seca, caso não seja possível têm de haver um controlo da adição de água.

Nas areias para reboco já se pode tolerar a presença de uma pequena quantidade de argila, no entanto, este material pode interferir nas reações de endurecimento da pasta, nomeadamente, pela dificuldade do ligante aderir ao agregado. (Costa, 1999)

### II.2.3 - Água

A água é, também um elemento importante que entra na composição das argamassas. É indispensável para a preparação das argamassas a existência de água, seja no que diz respeito às argamassas de ligantes aéreos, onde é necessária para desencadear as condições para estes materiais adquirirem propriedades aglutinantes e também para o início das reações químicas de carbonatação que exigem um certo grau de humidade, seja nas argamassas em que o ligante é hidráulico onde neste último caso é fundamental para promover as reações químicas para a obtenção dos silicatos e aluminatos de cálcio, conferindo ainda a consistência necessária à sua aplicação. No entanto a quantidade de água necessária para que a argamassa possa ser facilmente utilizada em obra é sempre superior à necessária para hidratar o ligante ou promover as suas reações de endurecimento. (Martins, et al., 2006)

A água de amassadura permite a hidratação do ligante, possibilitando a aglomeração dos constituintes e a constituição de uma pasta. A água confere a trabalhabilidade da argamassa condicionando a aderência ao suporte e o rendimento da mão-de-obra. A quantidade de água utilizada na amassadura depende de vários fatores como o tipo de ligante, o traço da argamassa, a granulometria da areia e a quantidade deste material presente no próprio agregado. O excesso de água na preparação de argamassas, poderá dar lugar a um maior volume de vazios, resultante da evaporação da mesma ao longo da cura do material. Este aumento da porosidade aberta coopera com a diminuição da resistência mecânica. Por outro lado, uma quantidade insuficiente de água proporciona, muitas vezes, uma mistura imperfeita, o que também não é desejável para a qualidade do reboco. A água de amassadura deve ser controlada de forma a obter uma argamassa com a consistência adequada, levando a um revestimento mais compacto, com menor tendência para a fissuração, menor permeabilidade ao vapor de água, e com maior capacidade resistente, embora menos trabalhável. (Martins, 2008)

Por último, a temperatura exerce influência no tempo de presa das argamassas, motivo pelo qual é aconselhável utilizar água a uma temperatura compreendida entre 7º C e 30º C, pois a presa é acelerada a temperaturas elevadas, acontecendo o inverso para temperaturas baixas. (Agostinho, 2008)

## II.3 - Características recomendadas das argamassas de substituição de rebocos

Os rebocos das paredes exteriores são os elementos construtivos particularmente expostos às ações climáticas e aos agentes de degradação, como tal registam frequentemente a presença de anomalias. O estado de conservação dos rebocos condiciona fortemente o comportamento de outros elementos construtivos, especialmente dos suportes, dado que a sua principal função é proteger esses elementos.

Assim, na reabilitação de edifícios antigos, as argamassas de substituição aplicadas em rebocos assumem um papel importante, dada a frequência com que os revestimentos são alvo de intervenção. Neste domínio têm sido utilizadas diversas argamassas, desde argamassas de cimento, a argamassas só de cal aérea, argamassas bastardas, aditivadas e até pré-doseadas, sendo que todas elas apresentam vantagens e inconvenientes, que devem ser equacionados de modo a não por em causa a necessária compatibilidade com o suporte e função de proteção.

Constata-se que, o desempenho dos rebocos de substituição não é apenas determinado pela formulação das argamassas utilizadas, dado que também é condicionado pelas técnicas de preparação, aplicação e cura, sendo as argamassas de cal aérea as que revelam maior dependência destes aspetos. (Veiga, 2003) (Veiga, 2005)

Porem, as soluções adotadas em intervenções sobre rebocos de edifícios antigos nem sempre são as mais adequadas e, muitas vezes, vêm a ser responsáveis pelo agravamento de processos de degradação em curso ou pelo desenvolvimento de novas formas de degradação. A remoção e a substituição integral de rebocos antigos por novos, constitui a solução adotada mais frequente, muitas vezes sem qualquer conhecimento do potencial desempenho do reboco de substituição e sem se analisarem as causas das anomalias observadas. (Veiga, et al., 2002) (Veiga, 2006)

Seguidamente proceder-se-á à apresentação das recomendações e exigências, relacionadas com propriedades físicas, mecânicas, químicas e estéticas, que os rebocos de substituição devem preferencialmente possuir para que sejam considerados como boas soluções a adotar.

Os rebocos de substituição não devem contribuir para degradar os elementos pré-existentes, ou seja, o suporte e as argamassas de assentamento, nem para a descaracterização da imagem do edifício. (Veiga, et al., 2002) (Veiga, 2003) (Veiga, 2005)

O revestimento deve ser selecionado e colocado de forma a admitir que o seu funcionamento trabalhe em conjunto com o suporte. Mas na prática este comportamento ideal é difícil de obter, assim sendo é necessário garantir que funcione como complemento do suporte, isto é, deve dar proteção e estabelecer-se como uma solução durável, sendo que a sua eficácia estará sempre dependente do suporte. (Agostinho, 2008)

Para que o revestimento possa desempenhar estas funções deve ser relativamente deformável, ter um módulo de elasticidade menor ou igual ao do suporte, apresentar características de permeabilidade compatíveis com o suporte e ter um bom comportamento face à presença de sais solúveis. É de salientar que estas exigências devem ser garantidas pelo revestimento no seu todo,

e não apenas por uma única camada de argamassa que normalmente é objeto de caracterização. Para uma mesma espessura total de revestimento, a sua execução através da aplicação de camadas mais finas e em maior número conduzem geralmente a soluções mais duráveis e com maior capacidade de proteção face à sua execução em camada única. Assim, tanto o número de camadas, como a sua espessura e composição são tão importantes quanto a sua aplicação e formulação. (Veiga, et al., 1994) (Veiga, et al., 2004) (Veiga, 2005).

Os rebocos de edifícios antigos eram feitos à base de argamassas de cal aérea e estas apresentam boa compatibilidade com as alvenarias do suporte, tanto em relação à sua deformabilidade, como de resistências mecânicas e comportamento à água a longo prazo. Todavia, presentemente as argamassas aplicadas são diferentes das usadas no passado, assim sendo é importante executar argamassas cujo comportamento se aproxime o mais possível das antigas, para que o suporte e as parcelas de reboco em bom estado se relacionem bem com o novo revestimento. Em termos de comportamento mecânico, esta compatibilidade normalmente apresenta um melhor desempenho quando o módulo de elasticidade da argamassa de revestimento é mais baixo que o do suporte e semelhante ao da argamassa pré-existente, visto que são garantidas as condições para que a argamassa se deforme de modo a acompanhar os movimentos do suporte e assim as tensões internas são baixas. Mas as características mecânicas dos rebocos não devem ser demasiadamente baixas de modo a garantir a sua aptidão de resposta face a ações mecânicas. (Agostinho, 2008)

Os rebocos de substituição devem ter uma adequada formulação e aplicação, mas não é uma tarefa fácil, uma vez que é difícil conhecer a composição original dos rebocos, as condições em que foi executado, aplicado e em que endureceu. Todos estes fatores influenciam fortemente o comportamento e as propriedades do material. Deste modo, tal como referido, as argamassas utilizadas em rebocos de substituição devem respeitar exigências estabelecidas para que revelem um desempenho adequado, sendo a durabilidade um aspeto essencial para que as restantes propriedades adquiram significado. (Agostinho, 2008)

O comportamento das argamassas face à água é uma das características essenciais para avaliar o seu potencial desempenho, dado que as argamassas de substituição devem apresentar uma permeabilidade ao vapor de água igual ou superior à do suporte, aumentando de dentro para fora nas várias camadas do reboco, no sentido de promover a rápida evaporação da água que se introduz no interior dos elementos da construção. O revestimento deve ser pouco permeável à água líquida, mas superior à respetiva permeabilidade do suporte, no sentido de dificultar a penetração de água líquida até este e a capilaridade também deverá ser semelhante às argamassas originais e igual ou superior à do suporte. (Veiga, et al., 2002) (Veiga, 2003) (Veiga, et al., 2004) (Veiga, 2005)

Nos edifícios antigos é frequente a presença de sais solúveis no interior das paredes. Este facto exige cuidados especiais para a seleção dos revestimentos a aplicar, principalmente no que se refere à necessidade de garantir que as novas argamassas não se constituam como fonte de sais solúveis, mas no caso de estes sais existirem, o teor deverá ser o mais reduzido possível, minorando os efeitos da cristalização de sais. O cimento e algumas cals hidráulicas apresentam quantidades significativas destes sais, o uso destes materiais em argamassas deve ser bem ponderado pois, embora aumente a resistência mecânica, podem contribuir para o agravamento



das formas de degradação que têm como causa fenômenos de cristalização de sais. (Veiga, et al., 1994) (Veiga, et al., 2004) (Veiga, 2005)

O reboco deverá ter capacidade de proteção e conservação das paredes. Como elemento protetor, de sacrifício, é essencial que o reboco de substituição promova uma eficaz proteção da parede face aos agentes agressivos do exterior, como a água, agressão química da poluição, agressão mecânica, etc. Para tal são fundamentais as propriedades descritas nos parágrafos anteriores, bem como resistência mecânica adequada, realçando a importância de terem uma trabalhabilidade aceitável, sem que para isso seja necessário o uso excessivo de água condicionando negativamente a resistência mecânica, e que confira também um aspeto estético aceitável aos paramentos de modo a evitar a descaracterização do edifício. (Veiga, et al., 2002) (Veiga, et al., 2004) (Veiga, 2005)

A durabilidade do revestimento e a sua contribuição para a duração do conjunto, como a referida capacidade de proteção das alvenarias e argamassas antigas, deverá ser tão elevada quanto possível. O que implica adequada resistência à colonização biológica, boa resistência mecânica, semelhante às das argamassas originais e inferior à do suporte, boa coesão, boa aderência ao suporte, a aderência nunca deve ter rotura coesiva pelo suporte, o que poderá comprometer a reversibilidade, e bom comportamento face à presença de sais solúveis, isto é, resistência química adequada. Refere-se igualmente a importância de garantir boas condições de cura, evitar produtos pouco permeáveis e ter atenção ao número e espessura das camadas de revestimento. (Veiga, et al., 2002) (Agostinho, 2008)

Em resumo, são vários os fatores a equacionar na seleção das argamassas para rebocos de substituição, não só os mencionados acima, mas também os que se referem ao tipo de edifício, a época de construção e ao ambiente envolvente.

Maria do Rosário Veiga, depois de vários estudos neste domínio, propôs alguns valores para características mecânicas e não-mecânicas a que as argamassas utilizadas em rebocos de substituição para aplicação em alvenarias antigas correntes nacionais, devem respeitar, quando não existe informação específica sobre as características do suporte e do revestimento original do edifício em causa. (Veiga, et al., 2002) (Veiga, 2003) (Veiga, 2005)

Estes valores são apresentados nas Tabela 1 e Tabela 2:

**Tabela 1: Recomendações estabelecidas para características mecânicas (Veiga, 2003)**

Uso	Caraterísticas Mecânicas (MPa)			Aderência (MPa)	Comportamento à retração restringida			
	Rt	Rc	E		Fr <sub>máx</sub> (N)	G (N.mm)	CSAF	CREF (mm)
Reboco exterior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000 - 5000	0,1 – 0,3 ou rotura coesiva pelo reboco	<70	>40	>1,5	>0,7
Reboco interior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000 - 5000		<70	>40	>1,5	>0,7
Juntas	0,4 – 0,8	0,6 - 3	3000 - 6000	0,1 – 0,5 ou rotura coesiva pela junta	<70	>40	>1,5	>0,7

Rt – Resistência à tração;

Rc – Resistência à compressão;

E – Módulo de elasticidade;

Fr<sub>máx</sub> – Força máxima induzida por retração restringida;

G – Energia de rotura à tração;

CSAF – Coeficiente de segurança à abertura da 1ª fenda (Rt/Fr<sub>máx</sub>);

CREF – Coeficiente de resistência da fendilhação (G/Fr<sub>máx</sub>).

**Tabela 2: Recomendações estabelecidas para características de comportamento à água e ao clima (Veiga, 2003)**

Uso	Comportamento à água					Envelhecimento artificial acelerado	Comportamento aos sais
	Ensaio clássico		Ensaio com humidímetro				
	S <sub>D</sub> (m)	C (kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )	M (h)	S (h)	H (mv.h)		
Reboco exterior	<0,08	<12; >8	>0,1	<120	<16 000	Médio: degradação moderada nos ciclos água/gelo	Teores reduzidos de sais solúveis. Resistência aos sais existentes na parede.
Reboco interior	<0,10	-	-	<120	-		
Juntas	<0,10	<12; >8	>0,1	<120	<16 000		

$S_D$  – Espessura da camada de ar de difusão equivalente (valor relacionado com a permeância), quanto maior for, menor será a permeabilidade ao vapor de água;

C – Coeficiente de capilaridade, que exprime a taxa de absorção de água por capilaridade nos instantes iniciais, enquanto esta se mantiver constante;

M – Atraso na molhagem, definido como o período de tempo desde a aplicação da água até esta atingir o suporte;

S – Período de humedecimento, que define o tempo em que o suporte permanece húmido;

H – Intensidade de molhagem, que define a quantidade de molhagem sofrida durante o ensaio, expressa através da área entre a linha que define a variação da tensão elétrica com o tempo e a linha correspondente ao valor da tensão no estado seco.



# III - Descrição do programa experimental e dos métodos de ensaio

## III.1 - Descrição geral

O trabalho teve como objetivo principal estudar a influência da substituição de pequenas quantidades de cal aérea por cimento da argamassa bastarda, no que se refere às suas características no estado fresco e no estado endurecido, tendo em vista a sua aplicação em rebocos de edifícios antigos.

Para dar resposta ao objetivo estabelecido tomou-se como referência uma argamassa de cal aérea hidratada sem qualquer adição de cimento com o traço volumétrico 1:2. A areia selecionada foi uma areia de rio. Deste modo, o traço volumétrico adotado para a definição do trabalho experimental foi de 1:2 (cal aérea e cimento: areia de rio).

O espalhamento estabelecido para estas argamassas foi de  $145 \pm 1$  mm, dado que permite obter argamassas com consistência compatível com a sua aplicação em rebocos. (Sequeira, et al., 2011)

Tendo em atenção que a adoção de traços definidos em massa permitem a produção de argamassas de forma mais rigorosa procedeu-se, na fase inicial do estudo, à conversão dos traços volumétricos estabelecidos em traços ponderais, com o objetivo de reduzir a variabilidade inerente à produção de argamassas no laboratório.

Após definição do traço ponderal procedeu-se à determinação da razão água/ligante (em massa), necessárias para obter uma consistência correspondente a um espalhamento de  $145 \pm 1$  mm, procedeu-se à definição do plano de ensaios estabelecido para dar resposta aos objetivos definidos para o presente estudo.

Deste modo, o plano de ensaios foi definido tendo como argamassa de referência uma argamassa de cal aérea, designada por A, com um traço volumétrico de 1:2 (cal aérea: areia de rio) e  $145 \pm 1$  mm de espalhamento.

A conversão do traço volumétrico em traço ponderal e a determinação da razão água/ligante (em massa) necessária para obter um espalhamento de  $145 \pm 1$  mm conduziu à seguinte composição ponderal (ligante: areia de rio):

**Tabela 3: Composição ponderal**

Argamassa	Traço volumétrico	Traço ponderal (g)	Razão ponderal água/ligante (em massa)
A	1:2	326,18 : 2530,87	1,78

O estudo da influência da adição de cimento em argamassas bastardas envolveu a análise das características de 7 formulações de argamassas com igual consistência ( $145\pm 1$  mm), sendo uma delas a argamassa de referência e as restantes correspondem a formulações com diferenças de adição de cimento de 5%.

Todas as misturas presentes nas formulações de argamassas bastardas estudadas tiveram como ligantes a cal aérea (que é do tipo CL90) e o cimento (CEM II/B-L 32,5N). As misturas foram estabelecidas tendo como ponto de partida a argamassa de referência, com um só ligante, em que esta corresponde a 100% de cal aérea e a 0% de cimento.

**A percentagem de ligantes de cada argamassa é apresentada na**

Tabela 4:

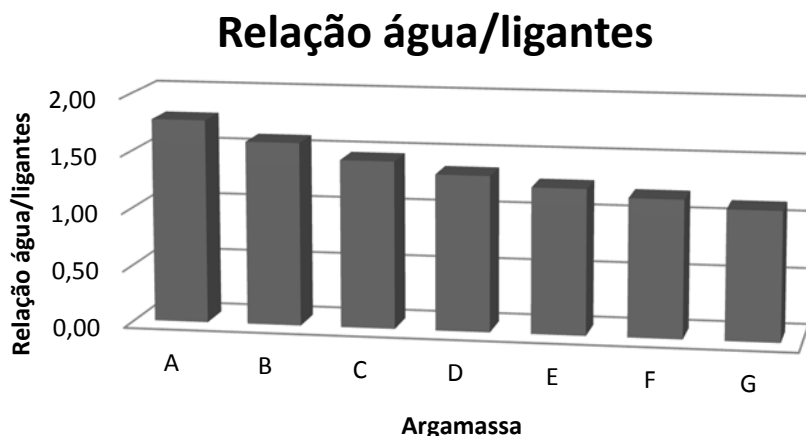
**Tabela 4: Composição das argamassas**

Argamassa	% de Ligante		Traço Volumétrico			Classificação da argamassa quanto à constituição
	ca	cp	ca	cp	ar	
A	100%	-	1,00	-	2	Argamassa de ligante aéreo
B	95%	5%	0,95	0,05	2	Argamassa de ligantes mistos (bastarda)
C	90%	10%	0,90	0,10	2	
D	85%	15%	0,85	0,15	2	
E	80%	20%	0,80	0,20	2	
F	75%	25%	0,75	0,25	2	
G	70%	30%	0,70	0,30	2	

ca – cal aérea; cp – cimento Portland; ar – areia de rio

As dosagens de água adotadas nas diferentes formulações estudadas foram definidas de modo a permitir analisar as argamassas constituídas por todas as misturas selecionadas e com igual consistência (correspondente a um espalhamento de  $145\pm 1$  mm).

O Gráfico 2 apresenta as relações água/ligante (em massa) das diferentes formulações estudadas, verificando-se que a quantidade de água adicionada diminui à medida que a quantidade de cimento aumenta.



**Gráfico 2: Relação água/ligante (em massa) para a obtenção de um espalhamento de  $145\pm 1$  mm**

Para cada uma das formulações foram produzidos 12 provetes prismáticos (40x40x160[mm]), 3 provetes circulares ( $\phi 95$ ,  $e=20$  [mm]) e aplicados 2 cm de argamassa em 3 tijolos maciços. Para a produção destes provetes foi necessário realizar 8 amassaduras de cada argamassa estudada.

A caracterização de todas as argamassas foi efetuada aos 28, 90 e 210 dias de idade. Os provetes produzidos foram conservados numa sala condicionada a uma temperatura de  $20\pm 2$  °C e uma humidade relativa de cerca de 65%, os provetes circulares foram conservados numa sala condicionada com a mesma temperatura mas com uma humidade relativa de 50%, até ao início da sua caracterização. Esta cura diferente deve-se ao facto de se ter pretendido realizar este ensaio, permeabilidade ao vapor de água, segundo a norma europeia 1015-19 (EN 1015-19, 1998).

A Figura 6 esquematiza os ensaios realizados aos 28, 90 e 210 dias de idade.

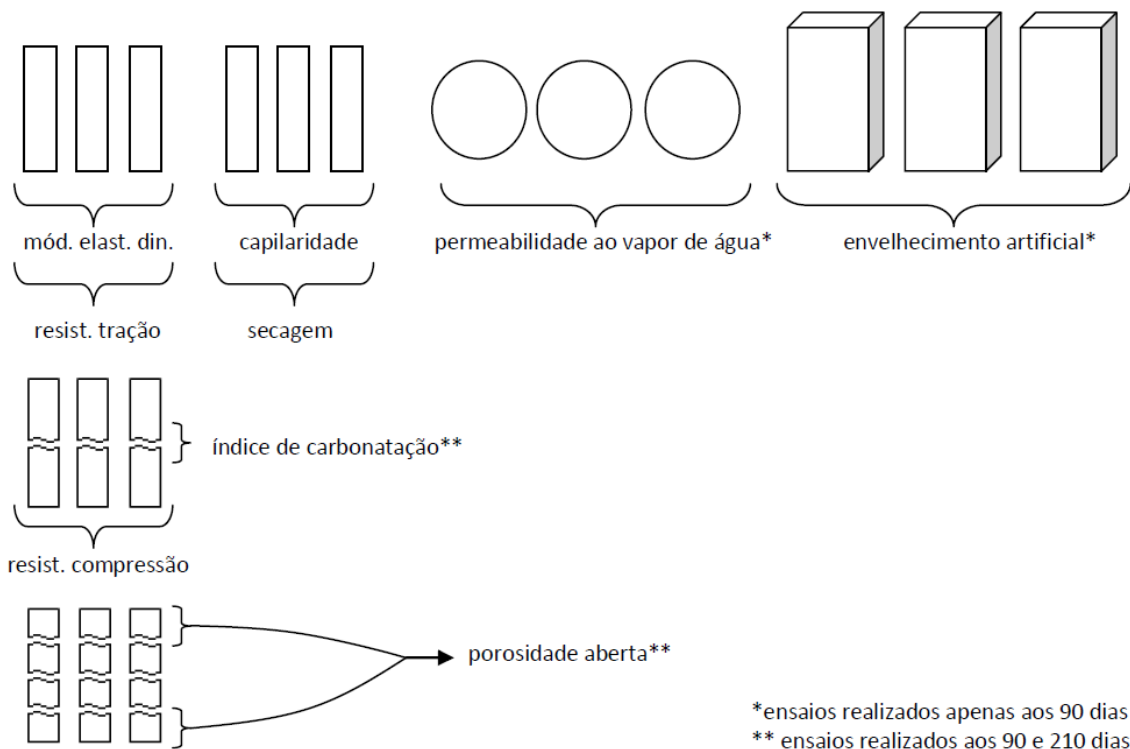


Figura 6: Metodologia de obtenção de provetes para os ensaios

## III.2 - Constituintes das Argamassas

### III.2.1 - Ligantes

Os ligantes utilizados neste estudo foram a cal aérea hidratada com referência H100 da Lusical, do tipo CL90 e adquirida na Maxical (Figura 7) e o cimento CEM II/B - L 32,5 N da Secil (Figura 8). A cal foi fornecida em sacos de 20 kg e o cimento foi fornecido em sacos de 40 kg.



Figura 7: CL 90



Figura 8: CEM II/B-L 32,5N



O ensaio realizado para a caracterização dos ligantes foi o cálculo da massa volúmica aparente (baridade) (NP-955:1973, 1973), este foi necessário para a determinar o traço ponderal.

### III.2.2 - Agregado

O agregado selecionado para o presente estudo foi uma areia do rio Tejo (da zona da Golegã). É uma areia predominantemente quartzítica e com um grau arredondado, Figura 9. O grupo de ensaios selecionados para caracterizar a areia foi o seguinte:

- Determinação do volume de vazios (Margalha, 2010);
- Cálculo da massa volúmica aparente (baridade) (NP-955:1973, 1973);
- Determinação da curva granulométrica (NP EN 933-1, 2000).



**Figura 9: Areia de rio**

O volume de vazios e a curva granulométrica são fatores que afetam a estrutura porosa da argamassa, pelo que se considerou essencial serem analisados. A massa volúmica aparente (baridade) foi necessária para determinar as composições das argamassas em laboratório.

### III.2.3 - Água

Na produção das argamassas foi utilizada água potável, proveniente da rede de abastecimento público da cidade de Lisboa, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).



## IV - Procedimentos utilizados nos ensaios

Apresentam-se seguidamente os procedimentos efetuados para a caracterização da matéria-prima, a preparação dos provetes e os ensaios realizados à argamassa no estado fresco e endurecido.

### IV.1 - Descrição geral

Previamente à produção das misturas efetuou-se a secagem das areias numa estufa a uma temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 48h para assegurar que ficariam com massa constante, de modo a evitar que a humidade existente nas areias, devido à sua exposição ao ar livre, alterasse as características das misturas produzidas, o cimento também foi seco à mesma temperatura, já a cal foi seca a  $40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Os ensaios foram realizados após o arrefecimento natural até se encontrarem à temperatura ambiente.

A secagem da areia foi realizada progressivamente à medida que se realizavam as argamassas para evitar que a humidade existente no ar fosse transferida para as areias.

As pesagens dos constituintes de cada amassadura (cal, cimento e areias) foram efetuadas numa balança com precisão de 0,1 g (Figura 10).



Figura 10: Balança

## IV.2 - Caracterização da Matéria-prima

### IV.2.1 - Análise granulométrica da areia

A análise granulométrica foi efetuada pelo colega Samuel Barahona que se encontrava a realizar um trabalho sobre areias intitulado “Influência da matéria fina existente nas areias no comportamento das argamassas de cal em pasta”.

Esta análise foi realizada segundo a norma. (NP EN 933-1, 2000)

### IV.2.2 - Volume de vazios da areia

A determinação da percentagem de volume de vazios na areia foi realizada através de uma metodologia semelhante à proposta na publicação “Preparation and use of lime mortars” (Historic Scotland,1995) (Margalha, 2010)

O ensaio foi realizado usando duas provetas graduadas de volume conhecido (500 ml), uma das quais foi cheia até 500 ml com areia e a outra com o mesmo volume de água. Depois, preencheram-se os vazios da areia vertendo água sem ultrapassar o limite já atingido na proveta graduada pela areia. Posteriormente a se verificar o gasto da água, calculou-se a percentagem de volume de vazios da areia, que corresponde ao gasto de água para preencher o volume de vazios (Figura 11e Figura 12). (Margalha, 2010)

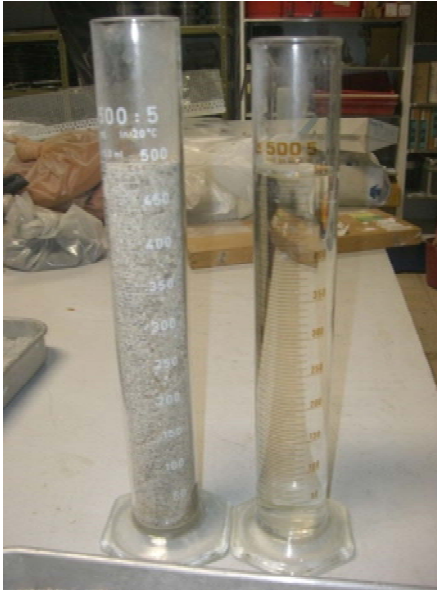
$$Vv = \frac{Vg}{Vi} \times 100 \text{ [%]}$$

Com:

Vv – volume de vazios [%]

Vg – volume de água gasta [ml]

Vi – volume inicial de água [ml]



**Figura 11: Início do ensaio - volume igual de areia e água**



**Figura 12: Fim do ensaio - areia saturada e volume de água gasta**

### IV.2.3 - Massa volúmica aparente dos materiais

A determinação da massa volúmica aparente dos constituintes das argamassas é obtida através da norma NP-955:1973 (NP-955:1973, 1973) com o seguinte procedimento:

Utilização de dois recipientes, um cónico e outro cilíndrico, em que o recipiente cilíndrico tem massa ( $M_1$ ) e volume ( $V$ ) conhecidos. O material foi colocado no recipiente cónico sem compactar (Figura 13) e depois de este estar cheio abre-se um dispositivo no fundo, deixando cair por gravidade o material para o recipiente cilíndrico. Alisou-se a superfície pelo contorno (Figura 14) e limpou-se o recipiente, determinando-se a sua massa ( $M_2$ ).

A massa volúmica aparente é determinada pela seguinte expressão:

$$\rho = \frac{M_2 - M_1}{V} \text{ [g/dm}^3\text{]}$$

Com,

$\rho$  – massa volúmica do agregado [g/dm<sup>3</sup>];

$M_1$  – massa do molde cilíndrico [g]

$M_2$  – massa do agregado contido no molde cilíndrico [g];

$V$  – capacidade do recipiente cilíndrico [dm<sup>3</sup>].



Figura 13: Início do ensaio da baridade da areia



Figura 14: Fim do ensaio de baridade da cal

Para cada constituinte foram realizadas 3 medições, resultando a massa volúmica da média dos valores individuais.

### IV.3 - Preparação das argamassas

As argamassas foram preparadas seguindo a norma europeia EN 1015-2 (EN 1015-2, 1998), tendo o seguinte procedimento:

Introdução dos materiais sólidos na misturadora, esta foi ligada em baixa velocidade de modo a criar uma homogeneização do material. Em seguida juntou-se água de forma contínua durante 15 segundos (Figura 15) e o processo de mistura contínua até aos 2 minutos (Figura 16), procede-se a uma paragem na misturadora para efetuar a raspagem, com a pá de pedreiro, das paredes da cuba e dos materiais retidos no fundo desta (Figura 17), em seguida coloca-se novamente na misturadora por mais 30 segundos.



Figura 15: Junção de água na misturadora



Figura 16: Mistura dos materiais



**Figura 17: Raspagem das paredes e fundo da cuba com a pá de pedreiro**

## IV.4 - Ensaios em estado fresco

### IV.4.1 - Consistência por espalhamento

O ensaio de consistência foi realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-3 (EN 1015-3, 1999), sendo obtida através do seguinte procedimento:

Colocou-se o molde tronco-cónico normalizado bem centrado sobre o prato da mesa de espalhamento (Figura 18). Com o molde fixo, introduziu-se a argamassa no seu interior em duas camadas (Figura 19), compactando-se cada uma delas com 10 golpes com o varão de compactação (Figura 20). Depois alisou-se o topo superior do molde, retirando-se o excesso e limpou-se. Então de seguida retirou-se o molde na vertical e aplicou-se 15 pancadas igualmente espaçadas, em 15 segundos na mesa de espalhamento (Figura 21). E por fim, mediu-se o diâmetro da argamassa espalhada segundo duas direções da mesa de espalhamento (Figura 22).



**Figura 18: Mesa de espalhamento**



**Figura 19: Inserção da argamassa no tronco-cónico**



**Figura 20: Compactação da argamassa**



**Figura 21: Ensaio da consistência por espalhamento**



**Figura 22: Medição da consistência por espalhamento**

#### **IV.4.2 - Massa volúmica da argamassa em pasta**

A massa volúmica foi calculada segundo a norma europeia EN 1015-6 (EN 1015-6, 1998), tendo o seguinte procedimento:

Pesar o molde metálico com capacidade de um litro (Figura 23), depois encheu-se com argamassa em duas fases (Figura 24), tendo sido feito em cada uma delas uma compactação com 10 pancadas. Alisou-se a superfície pelo contorno e limpou-se o recipiente, determinando-se a sua massa e subtraindo-se esta ao peso do molde.





**Figura 23: Molde metálico**



**Figura 24: Enchimento do molde metálico**

### IV.4.3 - Preparação dos provetes

Após a caracterização das argamassas no estado fresco é necessário preparar os moldes para a realização dos ensaios no estado endurecido. Tendo por base os ensaios a realizar, foram moldados três tipos de provete, prismático, circular e aplicação em tijolos. (EN 1015-19, 1998) (EN 1015-10, 1999) (EN 1015-11, 1999) (EN 1015-18, 2002)

Os moldes prismáticos utilizados têm dimensões de 40 x 40 x 160 (mm) e encontram-se em conjuntos de três moldes que foram previamente limpos e lubrificados com óleo mineral. Estes foram preenchidos com duas camadas de argamassa que se compactam individualmente com recurso ao pilão dando 25 pancadas uniformemente distribuídas.

Os moldes foram colocados numa sala condicionada com  $20 \pm 2$  °C e com humidade relativa de  $65 \% \pm 5$  %. O tempo de desmoldagem da argamassa foi de 3 dias após a sua realização. Após a desmoldagem, os moldes prismáticos foram limpos de qualquer resíduo de argamassa e os provetes mantiveram-se no mesmo ambiente até à realização dos ensaios.



**Figura 25: Material usado para a preparação dos provetes prismáticos**



**Figura 26: Molde prismático preenchido com a argamassa**

Os moldes circulares utilizados apresentam uma espessura de 20 mm e um diâmetro de 95 mm.

Os moldes foram limpos e lubrificados. De seguida foi introduzida a argamassa no molde e compactada ao mesmo tempo até o molde estar preenchido. Posteriormente a superfície foi alisada pelo bordo do molde. Os provetes são sujeitos a uma cura seca, na qual a temperatura é de  $20 \pm 2$  °C e a humidade relativa de  $50\% \pm 5\%$ .

O tempo de descofragem é o mesmo que para os provetes prismáticos, de 3 dias.

Após a desmoldagem, os moldes foram limpos de qualquer resíduo de argamassa e os provetes mantiveram-se no mesmo ambiente até à realização dos ensaios.



**Figura 27: Molde para os provetes cilíndricos**

Nas aplicações sobre tijolos, a escolha incidiu no tijolo maciço, uma vez que é o tijolo usualmente utilizado na construção de edifícios antigos.

O molde do tijolo é construído ao mesmo tempo da realização da moldagem. Em cada aresta de maior dimensão do tijolo é colocada uma tábua de madeira com altura correspondente a espessura pretendida de argamassa como está representado na Figura 28. As tábuas de madeira são presas com grampos. As superfícies de contacto com a argamassa são humedecidas com água de maneira a prevenir a absorção de água pelo suporte. Após a preparação do molde, introduz-se a argamassa em estado fresco com uma colher de pedreiro, perfazendo uma altura de 2 cm, alisando a parte superior com uma ripa de madeira (Figura 29). Cada argamassa é aplicada em três tijolos que são sujeitos a cura igual à dos provetes prismáticos, a uma temperatura de  $20 \pm 2$  °C e com humidade relativa de  $65\% \pm 5\%$ .



Figura 28: Preparação para a elaboração dos moldes para o revestimento em tijolos



Figura 29: Molde em tijolo preenchido

## IV.5 - Ensaio em estado endurecido

### IV.5.1 - Absorção de água por capilaridade e secagem

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-18 (EN 1015-18, 2002), sendo obtido através do seguinte procedimento:

Colocação dos provetes ao alto parcialmente imersos em 10 mm num tabuleiro com água. Obtenção das medições de observação da capilaridade, ao fim de vários períodos de tempo: 10, 30, 60, 90, 180, 300, 480 e 1440 minutos. Tendo estes dados foi possível fazer um gráfico de absorção de água.

A determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade é feita através da seguinte expressão:

$$C_c = \frac{0,1 * (M_2 - M_1)}{(\sqrt{90} - \sqrt{10}) * (0,04 * 0,04)} \text{ [kg/(m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})]$$

Com:

$C_c$  - coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/(m<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>)];

$M_2$  - massa de água absorvida aos 90 minutos, [kg];

$M_1$  - massa de água absorvida aos 10 minutos, [kg].

Para as argamassas de renovação, é proposto na norma o cálculo da água absorvida após 24 horas de acordo com a seguinte equação:

$$C = 0,625 * (M3 - M0) [kg/m^2]$$

Sendo:

C - absorção total de água por capilaridade aos 1440 minutos [kg/m<sup>2</sup>];

M3 - massa absorvida aos 1440 minutos [kg];

M0 - massa do provete no início do ensaio [kg].



**Figura 30: Ensaio de absorção de água por capilaridade**

O ensaio de secagem consiste em avaliar a velocidade de secagem por evaporação dos provetes através da medição da redução da massa após imersão inicial em água durante 24 horas. Este tem um procedimento inverso à de absorção de água por capilaridade. Após o início da secagem efetuaram-se medições ao fim de vários períodos de tempo: 30, 60, 90, 270, 450, 1440 minutos e posteriormente de 24 em 24h até a esta medida deixar de diminuir. Tendo estes dados foi possível fazer um gráfico de evaporação de água.

Os resultados são expressos em termos da variação do teor em água,  $\Delta M$ , em percentagem, e são obtidos pela seguinte expressão:

$$\Delta M = \frac{m_i - m_1}{m_1} \times 100 [\%]$$

Sendo,

$m_i$  - Massa registada no instante  $i$ ;

$m_1$  - Massa inicial do provete.



**Figura 31: Secagem dos provetes**

## IV.5.2 - Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido através de um ensaio que consiste em fazer passar vários impulsos de vibração com várias frequências pelos provetes de modo a obter um valor de frequência de ressonância longitudinal (Figura 32). Com este valor pode-se calcular o módulo de elasticidade através da seguinte modo (NF B 10-511, 1975):

$$E = 4 * L^2 * F^2 * \rho * 10^{-6} \text{ [MPa]}$$

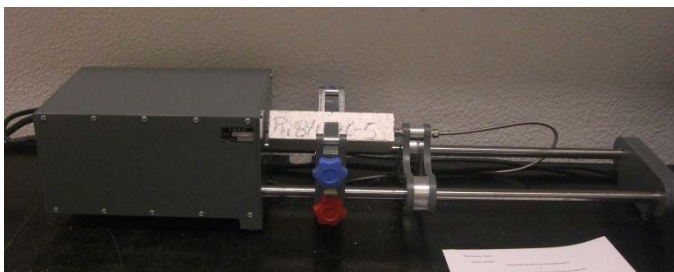
Com:

E – módulo de elasticidade dinâmico [Mpa];

L – comprimento longitudinal do provete [m];

F – frequência de ressonância longitudinal [Hz];

$\rho$  - massa volúmica [kg/m<sup>3</sup>]



**Figura 32: Determinação da frequência de ressonância**

Como este ensaio não é destrutivo os provetes foram usados para os ensaios de resistência à flexão e compressão.

### IV.5.3 - Resistência à flexão e à compressão

Os ensaios de resistência à tração por flexão e de resistência à compressão foram realizados segundo a norma europeia EN 1015-11 (EN 1015-11, 1999), através do equipamento apresentado na Figura 33.

Inicialmente os provetes foram pesados e medidos (Figura 34). Para a determinação da resistência à tração por flexão, foram colocados os provetes sobre dois apoios e submetidos a uma força aplicada entre eles, gradualmente crescente, que obriga o provete a partir por flexão. A carga é aplicada sem choque a uma velocidade de 10N/s com o propósito da rotura ocorrer entre 30 a 90 segundos (Figura 35).

O cálculo da resistência à tração por flexão é obtido através da seguinte equação:

$$Rf = 1,5 \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \text{ [MPa]}$$

Sendo:

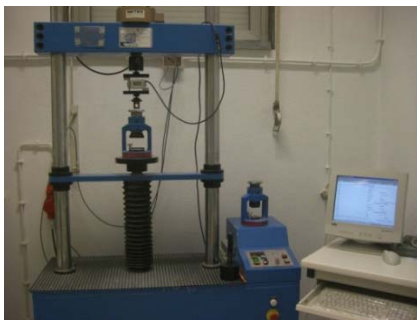
Rf- resistência à tração por flexão [MPa];

F – carga aplicada no centro do provete na rotura [N];

l – distância entre os apoios [mm];

b – largura da base do provete [mm];

d – espessura do provete [mm].



**Figura 33: Equipamento de medição da resistência à flexão e compressão**



**Figura 34: Pesagem dos provetes**



**Figura 35: Determinação da resistência à flexão**

No ensaio de compressão foram utilizados os meios provetes resultantes do ensaio anterior. Os provetes são colocados com uma das faces de moldagem de encontro com os marcadores, nos quais a carga é aplicada sem choque a uma velocidade de 50N/s observando se a rotura que ocorre entre os 30 e os 90 segundos (Figura 36).

O cálculo da resistência à compressão é obtido através da seguinte equação:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \text{ [MPa]}$$

Sendo:

R<sub>c</sub> - resistência à compressão [MPa];

F<sub>c</sub> - a carga máxima na rotura [N];

1600 - área do provete sujeita à força de compressão [mm<sup>2</sup>].



**Figura 36: Determinação da resistência à compressão**

#### IV.5.4 - Carbonatação

Este ensaio de avaliação da espessura de carbonatação realizou-se imediatamente após o ensaio de resistência à flexão sobre as superfícies de rotura das seis metades dos provetes prismáticos obtidas de cada argamassa. As superfícies de rotura foram pulverizadas com uma solução alcoólica de fenolftaleína a 1% de concentração. A fenolftaleína é um indicador químico que adquire cor roxa em zonas não carbonatadas pois esta reage com uma coloração roxa a pH compreendidos entre 10 e 12, este pH corresponde à zona ainda não carbonatada. O fenómeno de carbonatação faz com que o pH da argamassa baixe dos cerca de 12 para aproximadamente 8. Assim sendo, consegue-se avaliar a percentagem de carbonatação ocorrida. (Agostinho, 2008)

A avaliação é realizada observando a sua coloração e a zona carbonatada (zona incolor) em todos os lados para poder obter a percentagem de carbonatação.

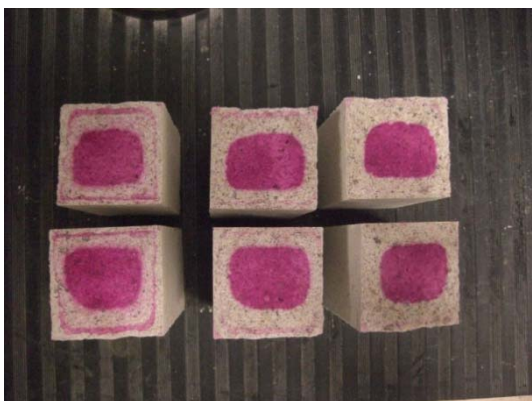


Figura 37: Ensaio de carbonatação aos 90 dias de idade

#### IV.5.5 - Porosidade aberta e massa volúmica

A porosidade aberta foi determinada pela introdução de água nos provetes segundo três medições; os provetes usados são os que resultam dos ensaios de resistência à compressão. (Botas, 2009)

Os provetes foram secos a  $60 \pm 5$  ° C até massa constante, durante 24 horas, e posteriormente retirados até atingirem a temperatura ambiente. Os provetes são pesados numa balança de precisão e deste procedimento obtém-se a massa M1;

Os provetes foram colocados num exsicador cuja pressão é diminuída até se atingir uma pressão negativa constante como se apresenta na Figura 38. (alguns trabalhos recomendam valores de pressão mínima dentro do exsicador). Este facto assume uma menor importância devido ao tipo de argamassas estudada. Após decorridas 24 horas, faz-se com que no exsicador penetre lentamente a quantidade de água necessária para a total imersão dos provetes (este procedimento deverá ser lento, 15 minutos são suficientes), mantendo-se a pressão referida por mais 24 horas. Os provetes são posteriormente mantidos imersos no exsicador, à pressão



atmosférica, durante um novo período de 24 horas. Após este tempo, são pesados em imersão (M2), seguidamente foi retirado o excesso de água da sua superfície com um pano húmido e pesados de novo no prato superior da balança (M3). A água usada foi da rede pública.

Os valores da porosidade aberta  $P_{ab}$  são determinados de acordo com as seguintes expressões:

$$P_{ab} = \frac{M3 - M1}{M3 - M2} * 100 \text{ [%]}$$

Em que:

M1: massa do provete seco (g)

M2: massa do provete saturado imerso [g]

M3: massa do provete saturado [g]



**Figura 38:** Decorrer do ensaio da porosidade aberta



**Figura 39:** Pesagem submersa dos provetes

Através deste ensaio também é possível obter a massa volúmica aparente e a massa volúmica real, com as seguintes fórmulas:

$$M_{vol} = \frac{M1}{M3 - M2} * 10^3 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$M_{real} = \frac{M1}{M1 - M2} * 10^3 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

Em que:

M1: massa do provete seco (g)

M2: massa do provete saturado imerso [g]

M3: massa do provete saturado [g]

## IV.5.7 - Permeabilidade ao vapor de água

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água foi executado de acordo com a norma europeia EN 1015-19 (EN 1015-19, 1998), sendo obtida através do seguinte procedimento:

Os provetes cilíndricos foram colocados sobre uma taça com 600 ml de água onde existe uma folga de 10 mm ± 5 mm entre os provetes e a superfície da água. Em seguida procedeu-se à selagem dos bordos dos provetes com cera.

As taças com os provetes foram colocadas numa câmara à temperatura de 20±2 °C e humidade relativa de 50% ± 5%. As massas das taças foram medidas constantemente até se obter uma perda de água constante. A permeabilidade é determinada pela seguinte fórmula:

$$\Lambda = \frac{1}{\frac{A * \Delta p}{\Delta G / \Delta t} - R_A} \quad [kg/m^2 \cdot s \cdot Pa]$$

Sendo:

$\Lambda$  – permeabilidade ao vapor de água [kg/m<sup>2</sup>.s.Pa]

A - área é a área da zona aberta do recipiente [m<sup>2</sup>]

$\Delta p$  – diferença de pressão em vapor de água entre o ambiente e a solução salina [Pa]

$\Delta G/\Delta t$  - fluxo de vapor de água [kg/s]

$R_A$  – resistência ao vapor de água da camada de ar entre a solução salina e o provete (0,048x10<sup>9</sup> Pa.m<sup>2</sup>.s/kg por cada 10mm de camada de ar)



Figura 40: Material usado para a preparação do ensaio de permeabilidade ao vapor de água

## IV.5.8 - Envelhecimento artificial

O ensaio de envelhecimento acelerado foi adaptado da norma europeia EN 1015-21 (EN 1015-21, 2002), segundo o seguinte procedimento: (Oliveira, 2012) (Penacho, 2012)

São executados dois tipos de ciclos, 8 ciclos de calor / gelo e 8 ciclos de chuva / gelo.

Sendo o primeiro constituído por aquecimento por radiação infravermelha a  $60 \pm 2$  °C, durante  $8 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$  (Figura 41), depois estabilização a  $20 \pm 2$  °C e  $65 \pm 5\%$  de humidade relativa, durante  $1 \text{ h} \pm 2 \text{ min}$  e por fim o arrefecimento a  $-15 \pm 1$  °C (Figura 42), durante  $15 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$ .

O segundo ciclo é composto por aspersão dos provetes com água a  $20 \pm 1$  °C, do lado da argamassa, durante  $8 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$ , estabilização de  $20 \pm 2$  °C e  $65 \pm 5\%$  de humidade relativa, durante  $1 \text{ h} \pm 2 \text{ min}$  e no fim o arrefecimento a  $-8 \pm 1$  °C, durante  $15 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$ .

Entre a execução dos dois ciclos e no final do ensaio os provetes foram submetidos a condições normalizadas de  $20 \pm 2$  °C e  $65 \pm 5\%$  de humidade relativa, durante pelo menos 48h.

Durante a realização do ensaio foi-se observando o eventual surgimento de desagregação.

Com este ensaio, pretende-se reproduzir o envelhecimento normal das argamassas de revestimento através de ciclos de envelhecimento acelerado. Com os provetes utilizados neste ensaio pretende-se reproduzir as condições reais de utilização das argamassas de revestimento, sendo constituídos por tijolos maciços, pois a probabilidade da utilização destas argamassas neste tipo de tijolo é maior.



Figura 41: Câmara de envelhecimento e a decorrer a primeira etapa do primeiro e segundo ciclo do ensaio



**Figura 42: Arca frigorifica e a decorrer a segunda etapa do primeiro ciclo do ensaio**



# V - Apresentação e análise de resultados

## V.1 - Considerações gerais

O presente capítulo procede à apresentação e análise dos resultados obtidos tendo como objetivos principais estudar a influência da mistura de ligantes hidráulicos em argamassas com elevada percentagem de ligante aéreo, no que se refere às suas características no estado fresco e endurecido e também avaliar a influência da quantidade de ligante hidráulico relativamente à quantidade de ligante aéreo.

A Tabela 5 apresenta os diferentes traços volumétricos.

**Tabela 5: Traço volumétrico das argamassas (cal: cimento: areia)**

Argamassa	Traço volumétrico
A	1:2
B	0,95:0,05:2
C	0,90:0,10:2
D	0,85:0,15:2
E	0,80:0,20:2
F	0,75:0,25:2
G	0,70:0,30:2

O estudo teve início com a determinação da razão água/ligante (em massa) necessária para obter um espalhamento de  $145 \pm 1$  mm, para todas as argamassas. A caracterização de todas as argamassas foi efetuada aos 28, 90 e 210 dias de idade. Os provetes prismáticos e os tijolos foram conservados em câmara saturada a uma temperatura de  $20 \pm 2$  °C e uma humidade relativa da ordem de 65% até ser realizada a sua caracterização, já os provetes cilíndrico foram conservados a uma temperatura de  $20 \pm 2$  °C e uma humidade relativa da ordem de 50%.

As quantidades de ligante, agregados e água a utilizar na formulação das argamassas foram definidas de modo a permitir a produção, em cada amassadura, de uma quantidade mínima de 3 kg de argamassa, Tabela 6.

A produção de 18 provetes prismáticos foi realizada através da execução de 3 amassaduras, para os 3 provetes cilíndricos foi necessário realizar 3 amassaduras e para os 3 provetes em tijolo bastaram 2 amassaduras, tendo em atenção cada formulação de argamassas. Assim, no final da campanha, ter-se-ão realizado mais de 63 amassaduras para a elaboração de 168 provetes. Foram ainda produzidas várias amassaduras experimentais.

As formulações estudadas foram objeto de caracterização no estado fresco e endurecido. A caracterização no estado fresco foi obtida através da avaliação da consistência e da massa

volúmica. A caracterização física e mecânica no estado endurecido foi efetuada aos 28, 90 e 210 dias.

Na Figura 6 apresentam-se os ensaios que foram efetuados sobre os provetes que se encontram em “III.1 – Descrição geral”.

**Tabela 6: Quantidades utilizadas (g)**

Argamassas	Cal (g)	Cimento (g)	Areia (g)	Água (ml)
A	326,18	0	2530,87	580
B	309,87	39,73	2530,87	560
C	293,56	79,45	2530,87	550
D	277,25	119,18	2530,87	540
E	260,94	158,91	2530,87	535
F	244,64	198,63	2530,87	535
G	228,33	238,36	2530,87	530

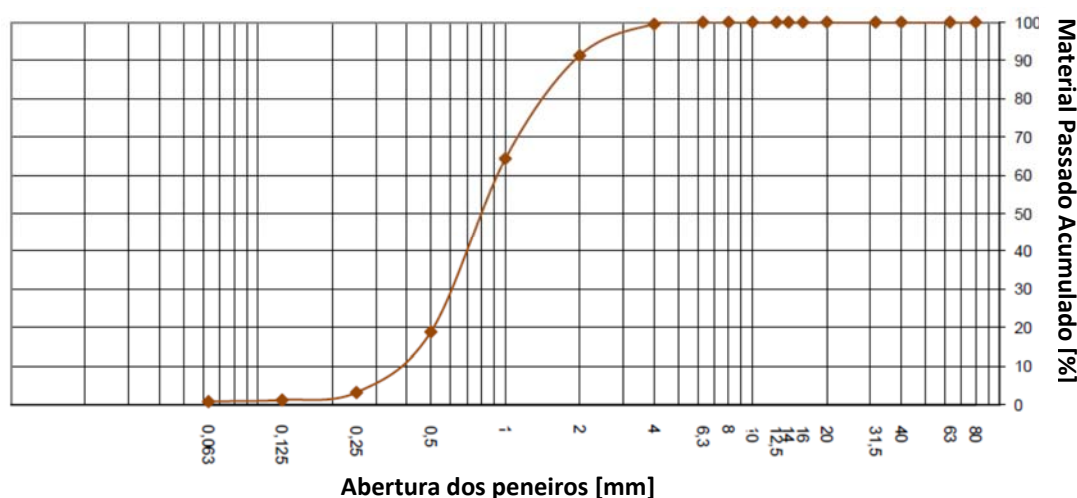
## V.2 - Caracterização dos Constituintes das Argamassas

### V.2.1 - Granulometria da areia

A caracterização dos agregados consiste na avaliação da sua granulometria, massa volúmica e volume de vazios das areias.

Usou-se uma areia proveniente do rio Tejo, de natureza quartzítica e com graus arredondados.

A curva granulométrica apresenta-se no Gráfico 3.



**Gráfico 3: Curva granulométrica da areia utilizada**

## V.2.2 - Volume de vazios da areia

Para um traço de 1 ligante para 3 de agregado, consideram-se adequadas as areias ou misturas de areias com um volume de vazios de 30 a 34%. Assim, para maiores volumes de vazios das areias, deveriam usar-se traços mais ricos em ligante. (Margalha, et al.)

O volume de vazios da areia é de 37%, segundo o ensaio realizado. Contudo, o traço volumétrico escolhido foi de 1:2 (ligante: agregado) tendo-se optado por um traço rico em ligante seguindo os resultados favoráveis obtidos em anteriores investigações onde o ligante predominante é a cal aérea (Margalha, 1997) (Margalha, 2010), e ao longo das investigações realizadas pela Eng.<sup>a</sup> Rosário que determinaram a existência de argamassas antigas ricas em ligantes. (Veiga, et al., 2002) (Veiga, et al., 2004)

## V.2.3 - Ligantes

A cal utilizada provém da zona de Alcanede e é de uso corrente na construção, sendo do tipo CL90.

O cimento utilizado é do tipo Portland, CEM II/B – L 32,5 N e é nacional.

## V.2.4 - Massa volúmica aparente dos materiais

A massa volúmica aparente (baridade) foi determinada da mesma forma para todos os constituintes das argamassas estando representada na Tabela 7.

**Tabela 7: Baridade dos materiais**

Materiais	Massa volúmica aparente	
	Valores individuais (g)	Média (g)
Cal aérea	571,4; 568,4; 564,9	568,2
Cimento	840,6; 838,3; 838,8	839,2
Areia	1112,8; 1111,4; 1110,9	1111,7



## V.3 - Caracterização das Argamassas no Estado Fresco

A caracterização no estado fresco efetuou-se com base no ensaio de espalhamento e o ensaio de determinação da massa volúmica.

Como referido atrás o estudo foi iniciado com a determinação da razão água/ligante (em massa) necessária para se obter um espalhamento de  $145\pm 1$  mm para todas as argamassas, de modo a ter uma boa trabalhabilidade com a menor quantidade de água possível.

A Tabela 8 apresenta o traço volumétrico, a relação água/ligante (em massa) e o espalhamento obtidos nas diversas argamassas. A determinação da relação água/ligante (em massa) corresponde a um espalhamento de  $145\pm 1$  mm para todas as argamassas.

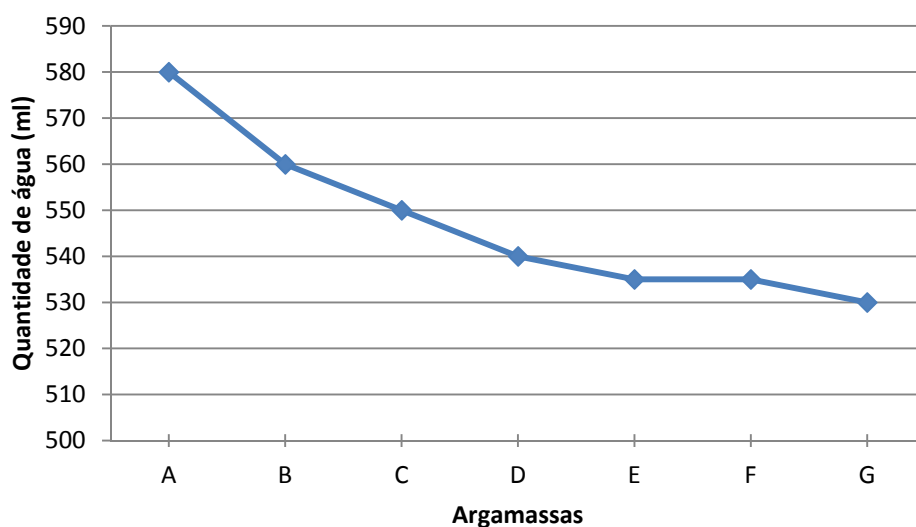
**Tabela 8: Determinação da relação água/ligante (em massa) das argamassas**

Argamassa	Traço volumétrico (Cal: Cimento: Areia)	Razão água/ligante (em massa)	Espalhamento (mm)
A	1:2	1,78	146
B	0,95:0,05:2	1,60	144
C	0,90:0,10:2	1,46	145
D	0,85:0,15:2	1,36	145
E	0,80:0,20:2	1,27	144
F	0,75:0,25:2	1,21	146
G	0,70:0,30:2	1,14	146

**Tabela 9: Características das argamassas no estado fresco**

Argamassa	Traço volumétrico			Água (ml)	Relação água/ligante (em massa)	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
	Cal	Cimento	Areia			
A	1	0	2	580	1,78	1953
B	0,95	0,05	2	560	1,60	1975
C	0,90	0,10	2	550	1,46	1993
D	0,85	0,15	2	540	1,36	2001
E	0,80	0,20	2	535	1,27	2008
F	0,75	0,25	2	535	1,21	2015
G	0,70	0,30	2	530	1,14	2031

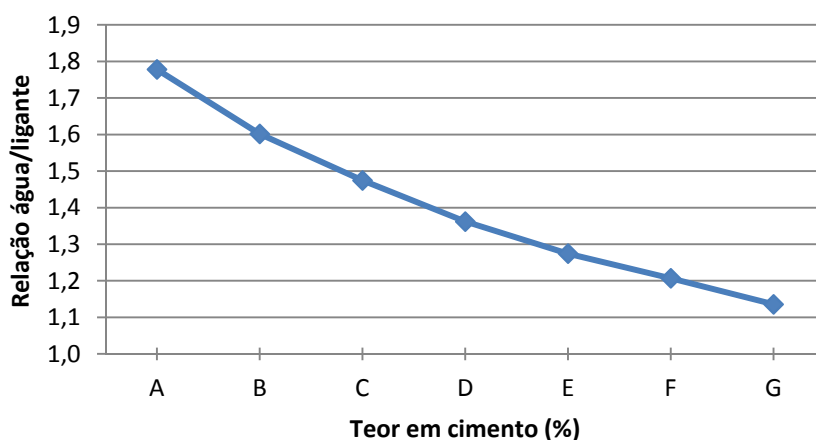
No Gráfico 4 é possível verificar que a necessidade de água das argamassas vai diminuindo com o aumento da adição de cimento para obter a mesma consistência.



**Gráfico 4: Quantidade de água necessária para atingir o espalhamento pretendido para cada argamassa**

O Gráfico 5 apresenta a relação água/ligante com o teor de cimento nas argamassas com 145 mm de espalhamento, tendo sido este o critério de comparação usado entre as diferentes argamassas, apesar de a trabalhabilidade se ter alterado com o aumento da adição de cimento, tendo esta diminuído ligeiramente. Da análise do gráfico pode afirmar-se que existe uma relação inversamente proporcional entre a relação água/ligante para o mesmo espalhamento e o teor de

cimento, e ainda que o aumento do teor de cimento da argamassa diminui a quantidade de água necessária para obter o mesmo espalhamento.



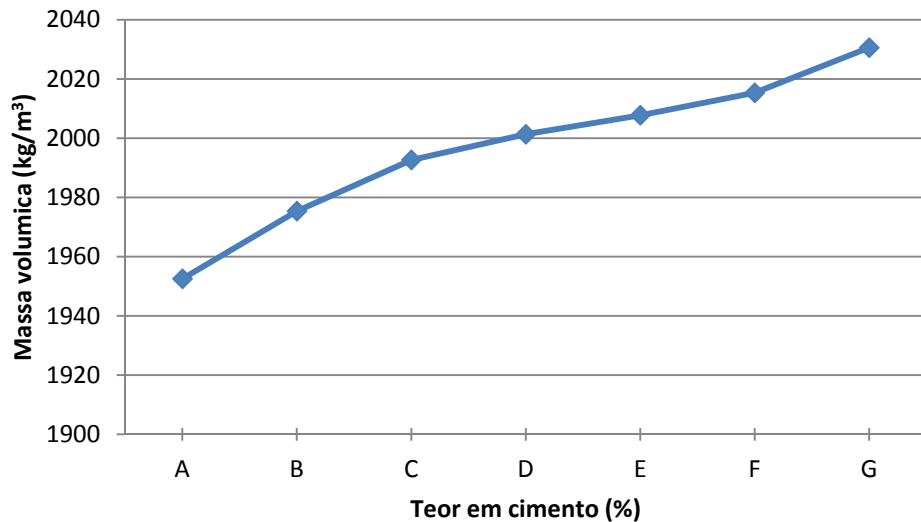
**Gráfico 5: Relação entre a relação água/ligante (em massa) e o teor em cimento das argamassas**

A avaliação da massa volúmica no estado fresco foi efetuada após a realização do ensaio de consistência, utilizando a mesma amassadura. A Tabela 10 apresenta o volume e a correspondente massa do recipiente utilizado.

**Tabela 10: Características do recipiente utilizado no ensaio**

Características	
Volume do recipiente – V (L)	1
Massa do recipiente – m1 (kg)	0,4638

Na Tabela 9, são apresentados os valores da massa volúmica obtidos através do procedimento de ensaio descrito em IV.4.2. Observando o Gráfico 6, verifica-se que a massa volúmica das argamassas vai aumentando com o incremento de teor de cimento e mantendo o espalhamento de 145 mm.



**Gráfico 6: Relação entre a massa volúmica aparente e o teor em cimento das argamassas**

Apresentam-se seguidamente as principais conclusões obtidas sobre o comportamento das argamassas no estado fresco:

- o aumento do teor de cimento de uma argamassa faz com que a argamassa necessite de menor quantidade de água de amassadura, para obter o mesmo espalhamento, conseqüentemente a relação água/ligante diminui;
- a massa volúmica aumenta devido ao aumento do teor de cimento, concluindo-se que há uma relação direta entre eles.
- o aumento de teor de cimento influenciou a trabalhabilidade, uma vez que o critério de comparação era o espalhamento de 145 mm, esta foi diminuindo ligeiramente.

## V.4 - Avaliação das características no estado endurecido

### V.4.1. Avaliação das Características Mecânicas

A avaliação das características mecânicas foi efetuada com a realização dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmica, de resistência à flexão e à compressão. Os resultados destes ensaios são apresentados no Tabela 11, no Gráfico 7, no Gráfico 8 e no Gráfico 9.

**Tabela 11: Resultados dos ensaios do módulo de elasticidade dinâmica, da resistência à flexão e compressão**

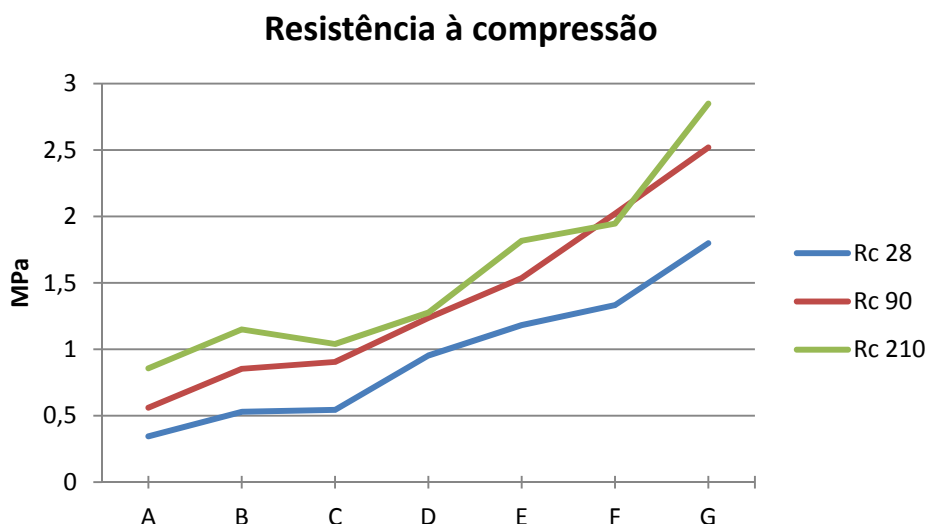
Porcentagem de cimento	Argamassa	E (Mpa)	Rf (MPa)	Rc (MPa)
0%	A – 28d	1893	0,41	0,35
	A – 90d	2750	0,55	0,56
	A – 210d	2874	0,35*	0,86
5%	B – 28d	2699	0,40	0,53
	B – 90d	3593	0,63	0,85
	B – 210d	3837	0,47	1,15
10%	C – 28d	2682	0,29*	0,54
	C – 90d	3402	0,67	0,91
	C – 210d	3716	0,59	1,04
15%	D – 28d	3074	0,63	0,95
	D – 90d	3519	0,66	1,24
	D – 210d	3939	0,47*	1,28
20%	E – 28d	3600	0,45*	1,18
	E – 90d	4131	0,73	1,54
	E – 210d	4460	0,88	1,82
25%	F – 28d	3811	0,67	1,33
	F – 90d	4797	0,87	2,02
	F – 210d	4743	0,91	1,95
30%	G – 28d	4521	0,78	1,80
	G – 90d	5546	1,11	2,52
	G – 210d	6126	1,15	2,85

\* Não foram valores esperados. Deveriam ser objecto de novos ensaios de modo a retirar dúvidas.

O ensaio de resistência à compressão realizou-se após o ensaio de flexão de onde resultam os meios provetes. Foram ensaiados seis meios provetes de cada tipo de argamassa obtendo-se assim uma amostra com alguma representatividade. Conforme previsto, a argamassa com maior teor em cimento apresenta maior resistência do que a argamassa de cal aérea sem qualquer

adição de cimento. Os resultados obtidos são explicados pelo facto da adição de cimento diminuir a quantidade de vazios e aumentar a coesão entre as partículas e pelo facto de os compostos hidráulicos formados terem maior resistência mecânica que o carbonato de cálcio resultante da carbonatação da cal aérea que é um processo que ocorre num período de tempo mais prolongado.

Sabe-se que uma argamassa de cimento é francamente mais resistente do que uma argamassa de cal aérea e que nas argamassas bastardas quanto maior for o teor em cimento da argamassa maior a sua resistência, se a quantidade de cimento for acima dos 30%. Em percentagens de cimento inferiores, tem existido alguma controvérsia sobre a melhoria da resistência pela adição do cimento porque há quem defenda que a pequena quantidade adicionada não é suficiente para se revelarem as características hidráulicas do cimento e que este bloqueia as reações de carbonatação da cal, sendo necessárias percentagens entre 33% a 50% para se garantirem os ganhos hidráulicos, sendo que essas quantidades trazem outras desvantagens, nomeadamente ao nível da permeabilidade ao vapor de água e à quantidade de sais que as argamassas contém. (HOLMSTROM, 1995) (O'HARE, 1995) (MARTINEZ, et al., 2007)

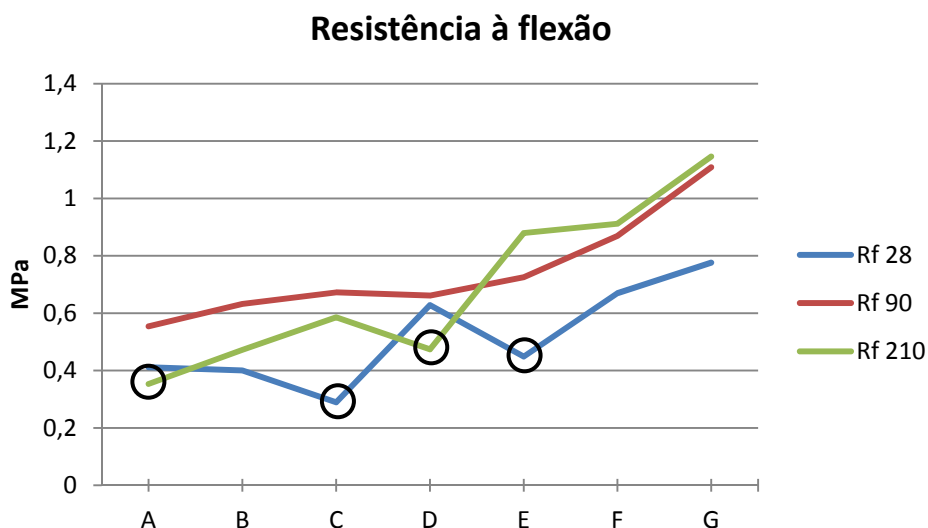


**Gráfico 7: Relação entre o valor médio da tensão de compressão e o teor em cimento das argamassas**

No entanto, os resultados dos ensaios realizados e presentes na Tabela 11 vêm comprovar que as resistências desenvolvidas nas argamassas têm um incremento com o aumento do teor de cimento. De facto, analisando os resultados obtidos, constata-se que à medida que se aumenta o teor de cimento da argamassa a resistência aumenta. A tensão de rotura aumenta com o aumento do teor em cimento de uma forma quase linear (Gráfico 7).

O ensaio de resistência à flexão é realizado após a medição do módulo de elasticidade dinâmica. Do ensaio da resistência à flexão resultam os meios provetes para o ensaio da resistência à compressão. Os resultados dos ensaios de flexão são os indicados na Tabela 11 e no Gráfico 8. Como se pode observar, as conclusões do ensaio de resistência à compressão podem ser transpostas, embora o comportamento não seja tão linear, para o ensaio de resistência à flexão. A

argamassa G, com maior percentagem de cimento continua a apresentar uma resistência superior à argamassa A, sem qualquer adição de cimento.



**Gráfico 8: Relação entre o valor médio da tensão de flexão e o teor em cimento das argamassas**

Nota: Os valores assinalados não foram valores esperados. Deveriam ser objecto de novos ensaios de modo a retirar dúvidas.

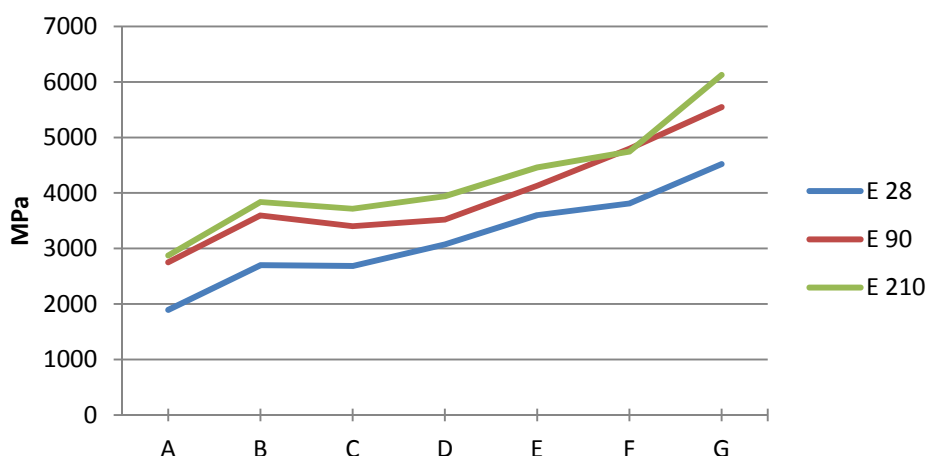
A notar o facto das grandezas, neste ensaio, serem muito inferiores ao ensaio de compressão, de constatar que nas duas primeiras argamassas estudadas com adição de cimento (5% e 10% de adição de cimento, argamassa B e C) a resistência à flexão diminui ligeiramente pois estas adições fazem com que os provetes fiquem mais compactos sendo dificultada a sua carbonatação, não adquirindo resistência aos 28 dias, mas com o passar do tempo esse efeito dilui-se e as resistências comparativamente à argamassa sem adição de cimento, argamassa A, vão aumentando. Também é de analisar a argamassa A e D (0% e 15% de adição de cimento) que têm resistência à flexão aos 28 dias superior que aos 210 dias (era esperado um valor mais elevado). A argamassa E (20% de cimento) é a que melhor evolui no tempo em relação à resistência à flexão. Constata-se que a resistência diminui dos 90 dias para os 210 dias nas argamassas A a D (de 0% até 15% de adição de cimento), esta diminuição poderá ocorrer devido ao aparecimento de microfissuração uma vez que o processo de carbonatação está concluído (como se poderá constatar mais à frente). O comportamento das argamassas F e G em relação ao aumento da resistência com tempo de endurecimento é muito linear, aproximando-se os valores aos 90 e 210 dias. Nestas argamassas, e no respeitante às resistências à flexão, há menos influência da existência da cal aérea cujo processo de endurecimento é mais longo e com um comportamento mais variável.

O ensaio do módulo de elasticidade dinâmico é o primeiro ensaio realizado no estado endurecido e mede a deformabilidade da argamassa além de permitir obter de modo qualitativo a resistência e o estado de coesão das argamassas. Estes resultados foram obtidos utilizando a média dos valores obtidos nos três provetes de cada argamassa. Os resultados são indicados na Tabela 11 e no Gráfico 9.

Como se pode observar, o módulo de elasticidade dinâmico na argamassa A é mais baixo do que na argamassa G devido à maior deformabilidade da argamassa, pois com maiores adições de cimento existe menor volume de vazios e resistências mais elevadas que afetam a elasticidade.

Quanto menor o volume de vazios numa argamassa maior é o módulo de elasticidade dinâmico. Estes resultados estão conforme o esperado depois de analisados os resultados da resistência à flexão e à compressão.

## Módulo de elasticidade



**Gráfico 9: Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o teor em cimento das argamassas**

Como se pode observar pela Tabela 11 e no Gráfico 9, há uma clara relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o teor em cimento da argamassa indicando que quanto maior for o teor em cimento de uma argamassa, maior será o módulo de elasticidade dinâmico, pois o cimento aumenta a resistência mecânica da argamassa, influenciando na sua elasticidade.

Verifica-se uma tendência crescente do módulo de elasticidade dinâmico com a diminuição da relação água/ligante, aumentando também a resistência da argamassa. Este facto estará diretamente relacionado com a diminuição de poros (vazios) em resultado da diminuição da quantidade de água de amassadura. Também os compostos hidráulicos formados têm poros de menor dimensão e apresentam maior rigidez que o carbonato de cálcio.

Comparando os valores obtidos aos 90 dias com os valores de recomendação observa-se que os resultados da argamassa E, F e G (20%, 25% e 30% de cimento) da tensão à flexão são superiores ao recomendado que é de 0,7 MPa . Também se observa na argamassa G (30% de cimento) que o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão são superiores aos valores recomendados, que seriam de 5000 Mpa e 2,5MPa, respectivamente.

Analisando-se os valores obtidos nos ensaios mecânicos, é possível concluir:

- nas argamassas bastardas quanto maior for o teor em cimento da argamassa, maior a sua resistência;



- há uma clara relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o teor em cimento da argamassa, verificando-se que quanto maior for o teor em cimento de uma argamassa maior será o módulo de elasticidade, o que se deve à maior rigidez adquirida pelas argamassas;
- à medida que a relação água/ligante aumenta, o módulo de elasticidade dinâmico reduz, diminuindo também a resistência da argamassa, o que estará diretamente relacionado com o aumento da quantidade de água na argamassa e também com os compostos hidráulicos formados;
- existe uma relação direta entre a resistência e o módulo de elasticidade, verificando-se que quanto maior é o módulo de elasticidade dinâmico, maior será a resistência à compressão e à flexão.

## V.4.2 - Avaliação das Características Físicas das Argamassas

A caracterização física das argamassas é feita através do ensaio de capilaridade e respetiva secagem, permeabilidade ao vapor de água, porosidade aberta, massa volúmica, carbonatação e envelhecimento acelerado.

### V.4.2.1 - Caracterização da absorção de água por capilaridade e secagem

Esta caracterização é efetuada com base no ensaio de absorção de água por capilaridade às 24h. Os resultados estão apresentados na Tabela 12 e nos Gráfico 10 até ao Gráfico 13. A secagem foi iniciada após a realização do ensaio de absorção de água por capilaridade, mede o tempo que o provete demora a secar à temperatura de  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  e com humidade relativa de  $65\% \pm 5\%$ , nas mesmas condições em que foi realizada a capilaridade. Os resultados estão apresentados na Tabela 13 e nos Gráfico 14 até ao Gráfico 17. Estes ensaios foram realizados aos 28, 90 e 210 dias de idade.

A absorção de água por capilaridade depende, não só da capacidade de sucção do material, mas também da quantidade de vazios existentes na argamassa. Uma argamassa muito porosa tem uma capacidade de absorção total muito maior que uma argamassa mais compacta. Também há que ter em conta a dimensão dos poros, que depende, entre outros fatores, da natureza do ligante. O cimento quando endurecido apresenta poros de menor diâmetro, diminuindo assim a velocidade de absorção de água. Por esta razão, resiste mais à passagem da água, criando uma barreira menos permeável. Assim, quanto maior for o teor em cimento mais compacta será a argamassa sendo expectável que seja menor a absorção de água. No entanto, a falta de permeabilidade à água nas argamassas, abaixo de um limite razoável, tem um efeito negativo quando utilizada em alvenarias antigas que precisam que a troca de humidade se processe na alvenaria e no revestimento, sendo que uma barreira menos permeável pode criar problemas graves na alvenaria na zona de separação desta com o revestimento (Margalha, 2010).

**Tabela 12: Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28, 90 e 210 dias**

Percentagem de cimento	Argamassa	CC (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	CC (kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )	Absorção total às 24h (kg/m <sup>2</sup> )
0%	A – 28d	2,29	17,77	36,78
	A – 90d	2,61	20,19	35,65
	A – 210d	2,42	18,73	35,45
5%	B – 28d	1,67	12,93	32,87
	B – 90d	1,63	12,62	31,95
	B – 210d	1,59	12,31	31,63
10%	C – 28d	1,79	13,89	33,19
	C – 90d	1,82	14,11	34,07
	C – 210d	1,95	15,10	33,76
15%	D – 28d	1,92	14,86	35,30
	D – 90d	1,90	14,70	34,42
	D – 210d	2,03	15,74	34,16
20%	E – 28d	1,92	14,88	36,92
	E – 90d	2,29	17,73	35,73
	E – 210d	2,20	17,04	35,88
25%	F – 28d	2,11	16,32	37,82
	F – 90d	2,17	16,78	37,54
	F – 210d	2,21	17,16	37,40
30%	G – 28d	1,85	14,36	36,10
	G – 90d	1,96	15,18	35,68
	G – 210d	2,65	20,51	35,49

Pode-se observar pela Tabela 12 que todos os valores do coeficiente de capilaridade se encontram acima de 12 kg/m<sup>2</sup>.h<sup>1/2</sup>, que é o limite superior de recomendação pela Eng.<sup>a</sup> Rosário Veiga. (Veiga, 2003). Este resultado poderá ser devido ao facto do agregado ter 37% de vazios que se considera um alto teor de vazios, uma vez que só se obtem valores razoaveis com boas curvas

granulométricas, assim sendo, poderá ter influenciado negativamente os resultados do ensaios de absorção de água por capilaridade.

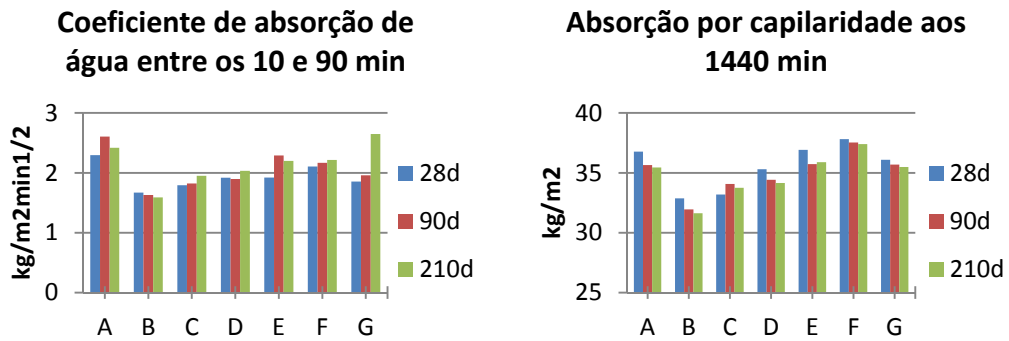


Gráfico 10: Coeficiente de absorção de água por capilaridade aos 28, 90 e 210 dias

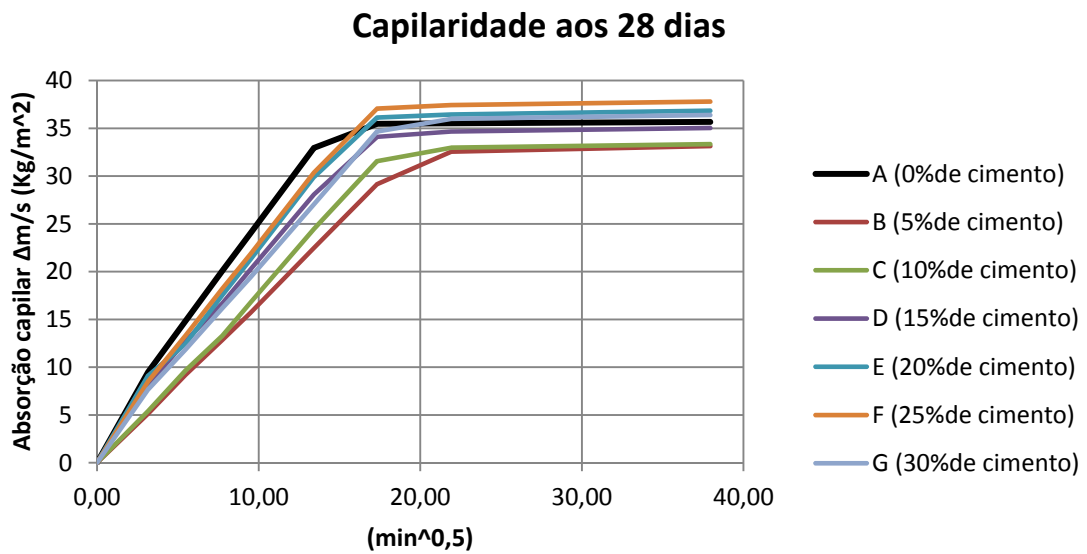


Gráfico 11: Representação dos resultados obtidos no ensaio de capilaridade para as argamassas aos 28 dias

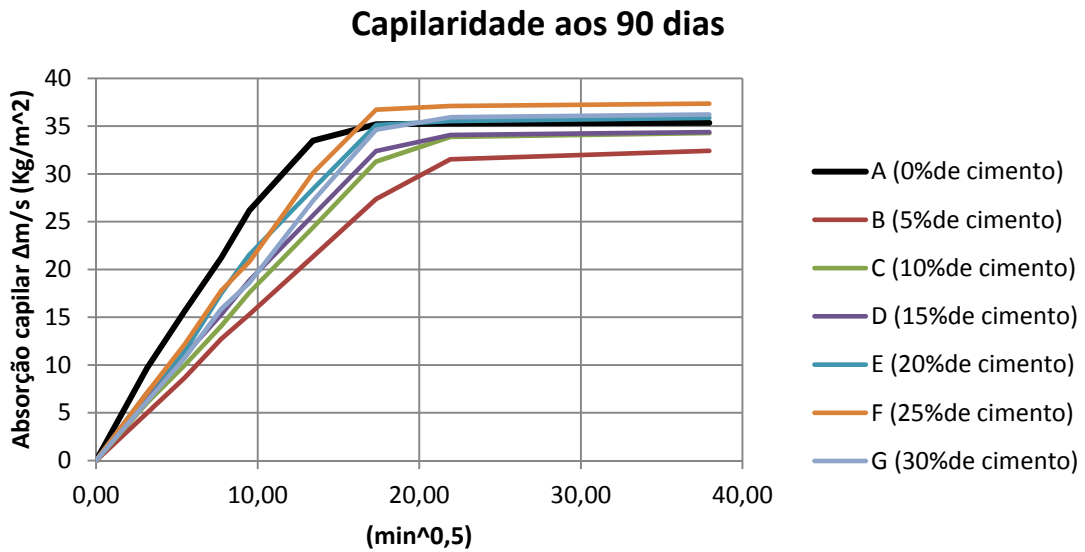


Gráfico 12: Representação dos resultados obtidos no ensaio de capilaridade para as argamassas aos 90 dias

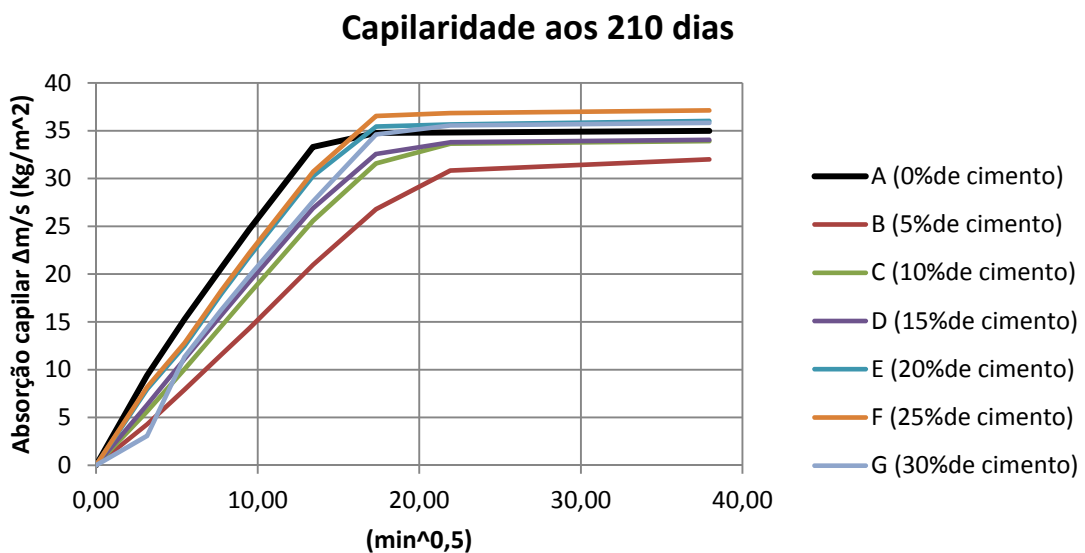
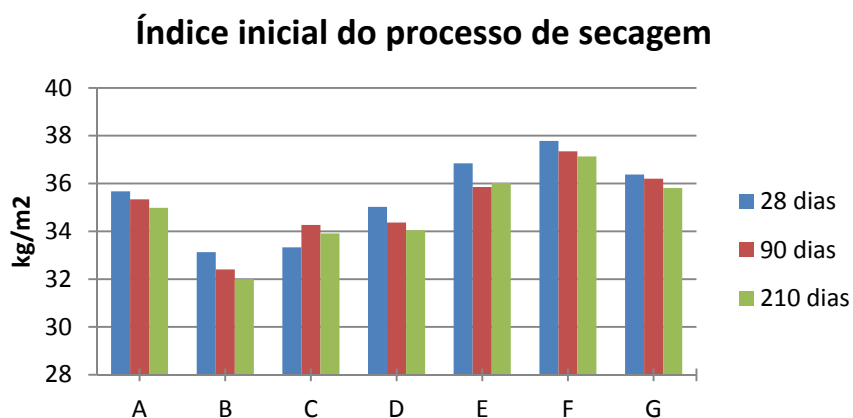


Gráfico 13: Representação dos resultados obtidos no ensaio de capilaridade para as argamassas aos 210 dias

Nos gráficos anteriores (Gráfico 10, Gráfico 11, Gráfico 12 e Gráfico 13) nota-se uma redução de absorção de água com a adição de cimento até aos 15% (argamassas B, C e D). A adição de 5% e 10% de cimento diminuiu bastante a absorção de água por capilaridade em qualquer idade. É de notar que as restantes argamassas (E, F e G, com 20%, 25% e 30% de cimento) têm uma absorção de água por capilaridade às 24 horas superior à da argamassa de referência (argamassa A) em todas as idades mas têm um coeficiente de absorção inferior.

**Tabela 13: Resultados do ensaio de secagem**

Percentagem de cimento	Argamassa	Índice inicial do processo de secagem (kg/m <sup>2</sup> )		
		28 Dias	90 Dias	210 Dias
0%	A	35,67	35,34	34,98
5%	B	33,13	32,41	32,00
10%	C	33,33	34,27	33,91
15%	D	35,03	34,37	34,04
20%	E	36,84	35,85	36,02
25%	F	37,79	37,35	37,13
30%	G	36,38	36,21	35,82



**Gráfico 14: Índice inicial do processo de secagem aos 28, 90 e 210 dias**

Da análise da Tabela 13 e do Gráfico 14, nota-se que a argamassa de cal aérea tem o teor final de absorção de água por capilaridade às 24 horas, maior do que as argamassas com as três primeiras adições de cimento (5%, 10% e 15% de adição de cimento, argamassas B, C e D, respetivamente).

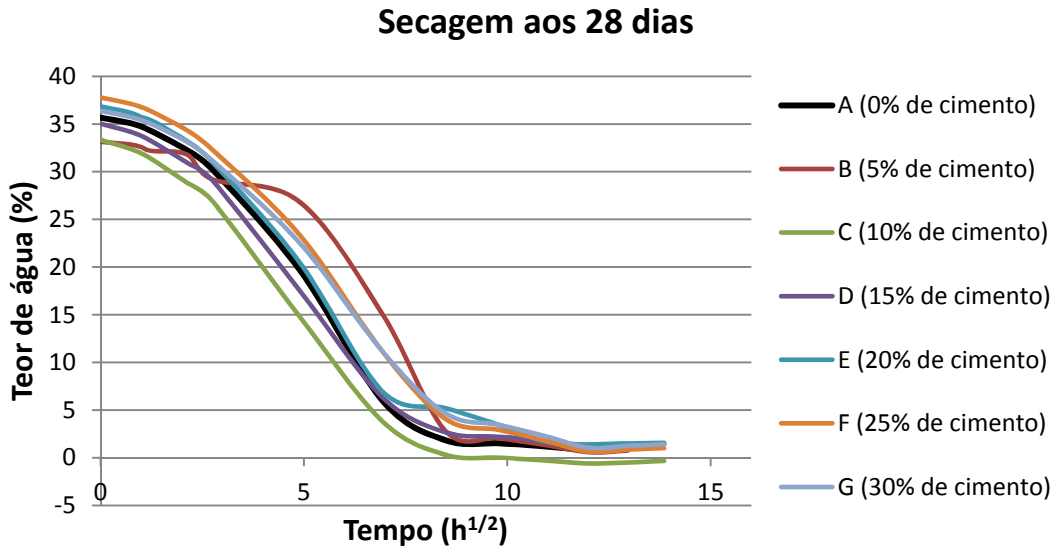


Gráfico 15: Relação entre o teor em água e o tempo de secagem das argamassas aos 28 dias

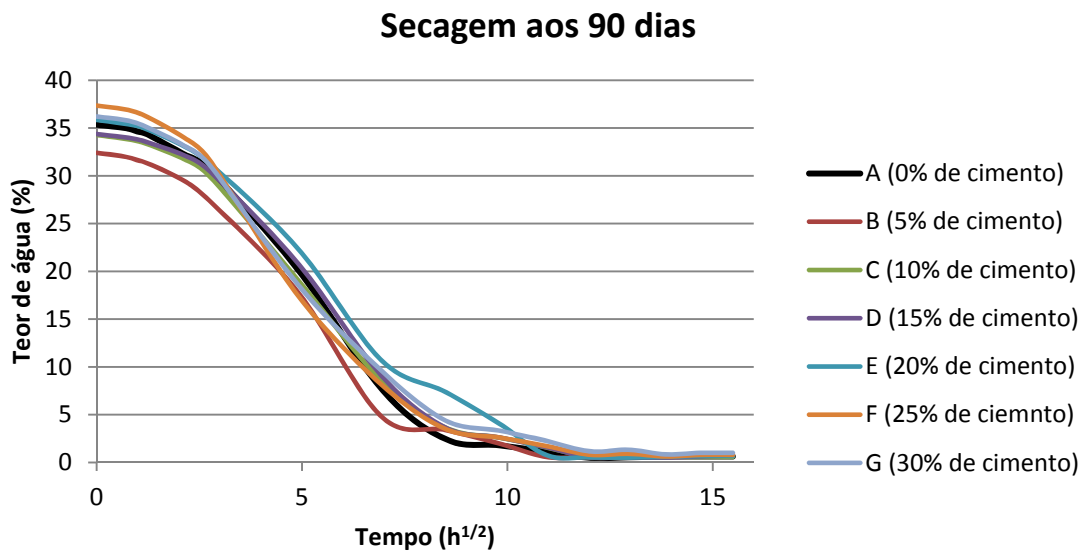
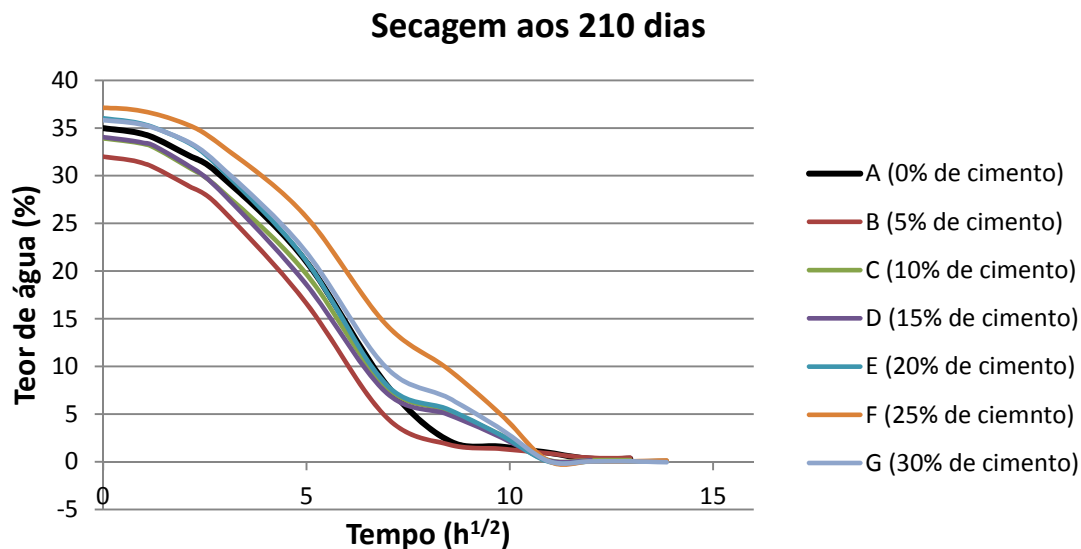


Gráfico 16: Relação entre o teor em água e o tempo de secagem das argamassas aos 90 dias



**Gráfico 17: Relação entre o teor em água e o tempo de secagem das argamassas aos 210 dias**

De notar através dos Gráfico 15, Gráfico 16 e 17 que todas as argamassas, seguem a mesma curva de secagem, exceto a argamassa B aos 28 dias e a argamassa F aos 210 dias. A argamassa B aos 28 dias não revela um comportamento normal o que pode dever-se a algum defeito nas medições efetuadas aos 28 dias, pois nas restantes idades apresenta resultados normais.

Verifica-se que as argamassas com maior percentagem de cimento, F e G, têm um período de secagem mais lento relativamente às restantes argamassas, visível aos 90 dias e aos 210 dias. A argamassa com menor percentagem de cimento, B, tem uma secagem mais rápida relativamente às restantes argamassas, nas idades de 90 dias e 210 dias.

Em conclusão, as argamassas com coeficientes de absorção de água mais elevados têm maior índice inicial no processo de secagem e curvas de secagem mais lentas. Em contrapartida, a argamassa de referência só com cal, argamassa A, tem um elevado coeficiente de absorção de água mas uma secagem mais rápida relativamente às argamassas com maior quantidade de cimento, F e G.

#### V.4.2.2 - Permeabilidade ao vapor de água

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água realizou-se apenas aos 90 dias de idade das argamassas, sendo este ensaio realizado com os provetes cilíndricos. No final do ensaio é possível calcular o fluxo de vapor de água e a permeância, sendo então possível determinar a permeabilidade ao vapor de água. A partir deste valor, por relação inversa, é determinada a espessura de ar de difusão equivalente por centímetro de argamassa. Assim, à medida que a permeabilidade aumenta, a espessura da camada de ar de difusão equivalente diminui, como se

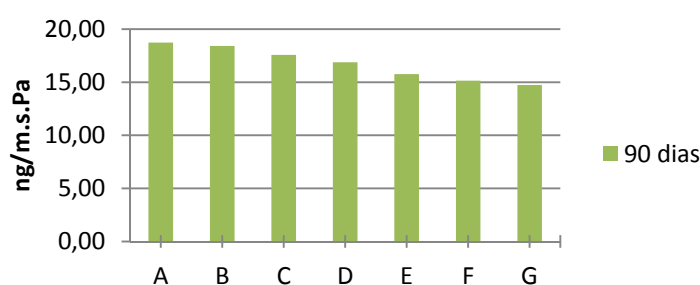
apresenta na Tabela 14, Gráfico 18 e Gráfico 19. Para o resultado deste ensaio teve-se como referência a argamassa A por se tratar de uma argamassa cujo único ligante é a cal aérea.

**Tabela 14: Permeabilidade ao vapor de água e espessura da camada de ar de difusão equivalente**

Argamassa	A	B	C	D	E	F	G
$P_{va}$ (ng/m.s.Pa)	18,73	18,42	17,57	16,88	15,77	15,14	14,74
$S_D$ (m)	0,10	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12	0,12

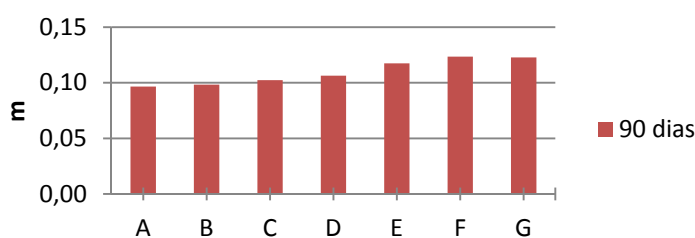
$P_{va}$  – Permeabilidade ao vapor de água;  $S_D$  - espessura da camada de ar de difusão equivalente

### Permeabilidade ao vapor de água



**Gráfico 18: Permeabilidade ao vapor de água aos 90 dias de idade**

### Espessura da camada de ar de difusão equivalente



**Gráfico 19: Espessura da camada de ar de difusão equivalente**

Pode-se verificar que nas primeiras adições de cimento, até 15% (argamassas B, C e D), a variação de permeabilidade ao vapor não é muito significativa, como se pode comprovar no Gráfico 18.

A determinação da permeabilidade ao vapor das argamassas permitiu verificar que com o aumento de teor em cimento as argamassas tornam-se menos permeáveis ao vapor de água, o que pode originar comportamentos mais desfavoráveis quando aplicadas em obra.

De acordo com as recomendações da Eng.<sup>a</sup> Rosário Veiga (2003) a espessura da camada de ar de difusão equivalente deverá ser para rebocos exteriores inferior a 0,08m e para rebocos interiores 0,10m. De acordo com os resultados expressos na Tabela 14 e no Gráfico 19 as argamassas com



adições de cimento a partir de 15% apresentam consequências negativas ao nível da permeabilidade ao vapor de água.

#### V.4.2.3 - Massa volúmica e Porosidade aberta

Aos 90 e 210 dias de idade das argamassas foi avaliada a massa volúmica aparente e a porosidade aberta. São determinadas a partir de três provetes de cada argamassa, após a realização do respetivo ensaio de resistência à compressão. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 15, nos Gráfico 20 e Gráfico 21.

**Tabela 15: Massa Volúmica real ( $MV_{real}$ ), Massa volúmica aparente ( $MV_{ap.}$ ) e porosidade aberta ( $P_{ab}$ )**

Percentagem de cimento	Argamassa	$MV_{real}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$MV_{ap.}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$P_{ab}$ (%)
0%	A – 90d	2480	1773	28,5
	A – 210d	2458	1786	27,3
5%	B – 90d	2466	1806	26,8
	B – 210d	2446	1823	25,5
10%	C – 90d	2488	1826	26,6
	C – 210d	2499	1853	25,8
15%	D – 90d	2538	1850	27,1
	D – 210d	2521	1873	25,7
20%	E – 90d	2514	1855	26,2
	E – 210d	2521	1869	25,9
25%	F – 90d	2537	1861	26,7
	F – 210d	2549	1886	26,0
30%	G – 90d	2541	1869	26,5
	G – 210d	2538	1893	25,4

## Porosidade aberta

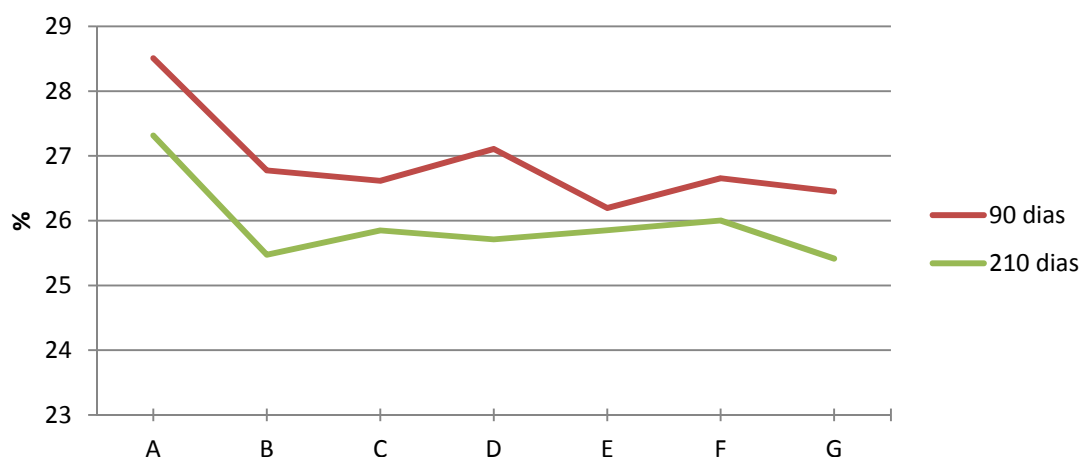


Gráfico 20: Porosidade aberta

## Massa volúmica aparente

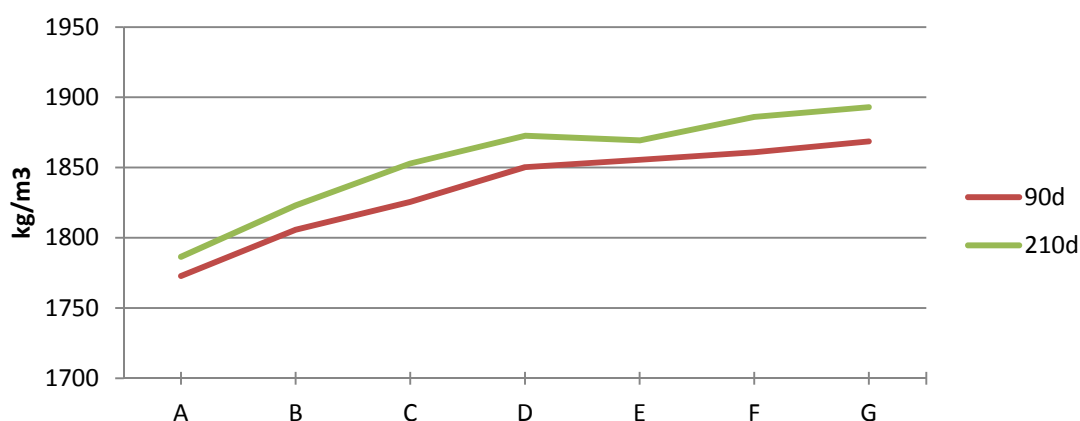


Gráfico 21: Massa volúmica aparente

Analisando os resultados obtidos, nota-se que a porosidade vai diminuindo com o decorrer do tempo e que a argamassa de cal (A) é a mais porosa, como se pode observar no Gráfico 20. Há um aumento do volume de poros com a quantidade de água usada na realização das argamassas (houve uma diminuição de quantidade de água usada na realização das argamassas com o aumento de adição de cimento) devido à evaporação de água ao longo da cura, a porosidade diminui também devido à redução da dimensão dos poros que são menores nos compostos hidráulicos. Também se pode observar que tal redução é linear até à argamassa C (10% de cimento), a partir daí a evolução deixa de ser linear mas continua abaixo da argamassa de referência (argamassa A).

A massa volúmica aparente vai aumentando consoante o aumento de teor de cimento, como está representado no Gráfico 21, este resultado já era esperado pois foi o que ocorreu no estado fresco e está relacionado com a massa volúmica superior do cimento em relação à cal

e também com a diminuição da porosidade nas argamassas com mais cimento. Também se constata que a massa volúmica aparente vai aumentando ao longo do tempo.

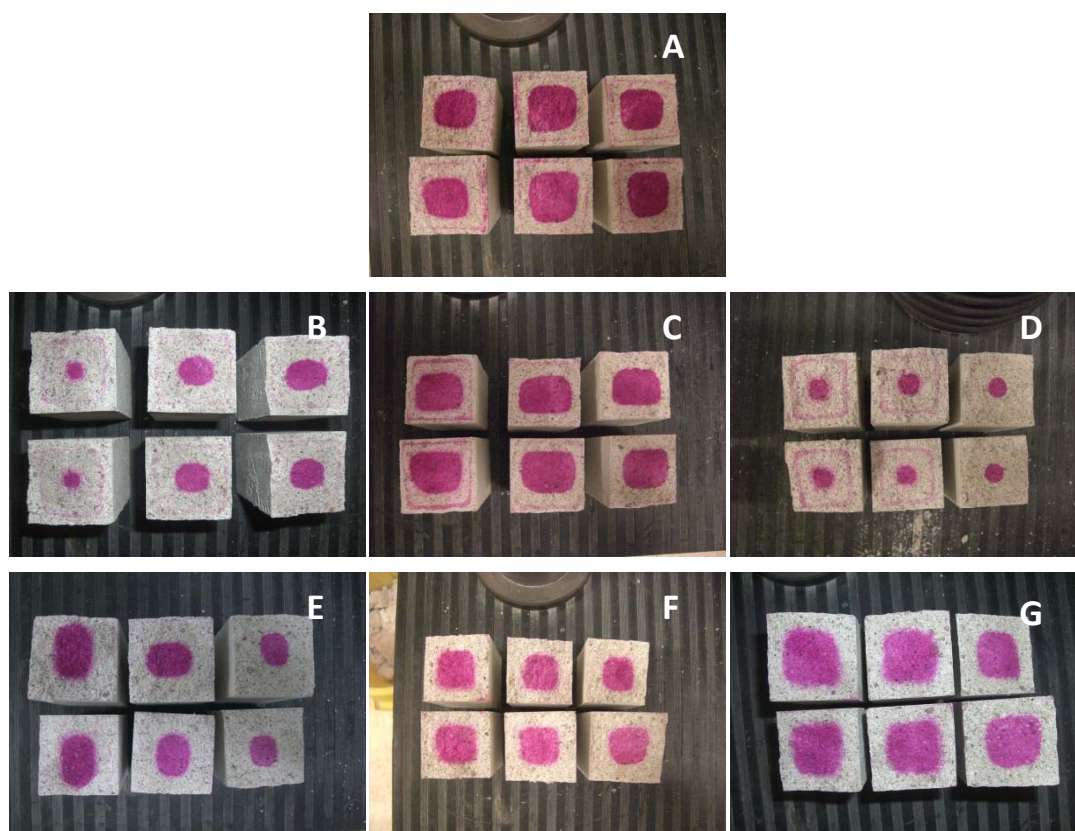
#### V.4.2.4 - Carbonatação

A carbonatação das argamassas de cal é um processo lento e que pode levar vários meses ou mesmo anos, dependendo das suas características, do modo de aplicação e das condições de exposição no meio ambiente. Pode-se avaliar este processo recorrendo à pulverização dos provetes, logo após a rutura no ensaio de resistência à flexão, com uma solução de fenolftaleína. (Penas, 2008)

Na Tabela 16 estão apresentados os valores médios da espessura carbonatada das argamassas, após 90 e 210 dias de desenvolvimento do processo de endurecimento.

**Tabela 16: Percentagem de carbonatação dos provetes aos 90 e 210 dias de idade**

Argamassa	A	B	C	D	E	F	G
90 Dias	38,7	13	38,1	7,7	20,6	30,1	35,2
210 Dias	100	100	100	100	98	100	100



**Figura 43: Apresentação da carbonatação de todas as argamassas aos 90 dias de idade**

## Carbonatação

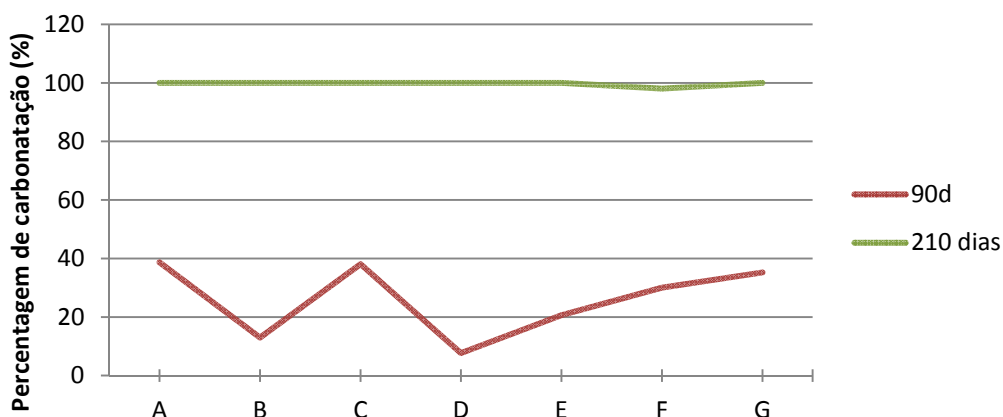


Gráfico 22: Carbonatação dos provetes aos 90 e 210 dias de idade



Figura 44: Argamassa E (20% de cimento) aos 210 dias de idade



Figura 45: Apresentação da carbonatação das restantes argamassas aos 210 dias de idade

Como se pode observar aos 90 dias de idade todas as argamassas com adição de cimento se encontram mais carbonatadas que a argamassa de cal (A), no entanto as argamassas C e G (10% e 30% de adição de cimento) encontram-se com uma carbonatação muito próxima da argamassa A. Também é de notar que estes resultados são obtidos através do pH existente na argamassa, e a adição de cimento pode influenciar esse mesmo pH, dando um resultado não linear. Aos 210 dias todas as argamassas se encontram praticamente carbonatadas, como se pode observar nas Figura 44 e Figura 45.

Pode-se concluir, apesar de os resultados aos 90 dias não terem sido muito esclarecedores, que a adição de pequenas quantidades de cimento não teve consequências negativas no processo de carbonatação já que aos 210 dias esta se encontra, para todas as argamassas, a 100% de carbonatação ou muito perto desse valor.

### V.4.2.5 - Envelhecimento acelerado

O ensaio de envelhecimento artificial acelerado foi realizado aproximadamente aos 90 dias de idade das argamassas. Depois de concretizado o ciclos de calor/gelo, as argamassas não apresentaram qualquer tipo de degradação, indicando um bom comportamento a este ciclo. De seguida no segundo ciclo de chuva/gelo a argamassa A apresenta o início de degradação na quarta repetição deste ciclo, como representado na Figura 46. No final da sétima repetição mais um provete da argamassa A apresentou sinais de degradação como se apresenta na Figura 47.



Figura 46: Início da degradação da argamassa A na 4ª repetição do 2º ciclo



Figura 47: Início da degradação da argamassa A na 7ª repetição do 2º ciclo

Simbologia			
Patologia	Ligeira degradação nos cantos	Ligeiro destacamento do revestimento nas extremidades	Degradação acentuada
Exemplificação			

Figura 48: Identificação e caracterização das patologias após o ensaio de envelhecimento

No final do ensaio e depois de 48h de estabilização observou-se que a argamassa A apresentava uma degradação acentuada e que nas restantes argamassas apenas foi observada uma ligeira degradação, como se apresenta na Figura 48.

Abreviando, nesta caracterização física, conseguiu-se obter algumas conclusões sobre o comportamento das argamassas relativas à absorção de água, secagem, permeabilidade, massa volúmica, porosidade, carbonatação e envelhecimento artificial, entre as quais se destacam:

- a argamassa de cal aérea sem qualquer adição de cimento, apresenta maiores quantidades de água absorvida em relação às restantes argamassas, devido à maior porosidade;
- a adição de cimento, em pequenas quantidades, é um fator importante no comportamento à água, pois este diminui o coeficiente de capilaridade, devido à redução da dimensão dos poros;
- a argamassa de cal aérea tende a estabilizar ligeiramente mais cedo, isto é, chega ao seu limite de saturação mais rapidamente, devido à maior dimensão dos poros;
- em todas as argamassas se verifica que o coeficiente de absorção de água por capilaridade está acima das recomendações, que é de  $1,55 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$  no máximo, (Veiga, 2003)
- a argamassa B (com 5% de adição de cimento) é a última a estabilizar, relativamente à absorção de água, sendo a média do início de estabilização das argamassas de 5h;
- as argamassas seguem a mesma curva de secagem em todas as idades, exceto a argamassa B aos 28 dias, provavelmente por um erro de ensaio;
- as argamassas com menos adição de cimento (argamassas B e C, 5% e 10% de cimento) secam mais rapidamente, e as argamassas com maior teor de cimento (argamassa F e G, 25% e 30% de cimento) secam mais lentamente, relativamente à argamassa de referência (argamassa A);
- as argamassas com adição de cimento superior a 15 % têm uma redução significativa da permeabilidade ao vapor relativamente à argamassa de referência (argamassa A), mas até 15% as diferenças não são significativas;
- cruzando os dados do comportamento à água líquida, ao vapor de água e à porosidade, pode-se concluir que as primeiras adições de cimento fazem com que haja uma diminuição da absorção da água líquida o que está relacionado com a diminuição da porosidade mas a sua permeabilidade ao vapor de água não diminui consideravelmente, facilitando a sua evaporação;
- todas as argamassas com adição de cimento resistem melhor ao envelhecimento artificial.



# VI - Conclusão e desenvolvimentos futuros

## VI.1. Considerações e conclusões gerais

A presente dissertação procura contribuir para o alargamento geral do conhecimento sobre a influência da adição de cimento no comportamento dos rebocos de cal aérea.

O estudo teve como objetivos principais estudar a influência da adição de pequenas quantidades de cimento em argamassas de cal aérea, no que se refere às suas características no estado fresco e endurecido, tendo em vista a sua aplicação em rebocos de edifícios antigos.

Para dar resposta aos objetivos estabelecidos tomou-se como referência uma argamassa de cal aérea com o traço volumétrico 1:2. A areia selecionada foi uma areia do rio Tejo. O espalhamento estabelecido para estas argamassas foi de  $145 \pm 1$  mm, dado que permite obter argamassas com consistência compatível com a sua aplicação em rebocos usando a menor quantidade de água possível.

O estudo da influência da mistura ligante foi efetuado com base em 7 formulações de argamassas, das quais uma delas corresponde à argamassa de referência (A), e as restantes 6 formulações estudadas foram estabelecidas com um aumento de adição de 5% de cimento (B a G).

Todas as misturas ligantes presentes nas formulações de argamassas bastardas estudadas são constituídas por CL 90 (cal aérea) e CEM II/B-L 32,5N (cimento). Estas misturas foram estabelecidas tendo como ponto de partida a argamassa de referência, que corresponde a 100% de cal aérea e a 0% de cimento.

É necessário ter em consideração que, para além das características próprias destas argamassas, existem outros fatores que influenciam o comportamento destas como, por exemplo, o modo e condições de aplicação, compactação da argamassa, condições de cura, características do suporte a revestir, humidade, temperatura, etc.

De modo a investigar as características mais importantes das argamassas, no que diz respeito ao desempenho como reboco quer a nível mecânico quer a nível físico, adotou-se um conjunto de ensaios que foram realizados em provetes prismáticos, com as dimensões de 40x40x160 [mm], provetes cilíndricos, com espessura de 20mm e 95mm de diâmetro e em tijolo maciço com revestimento de 2cm.

Este trabalho foi realizado durante os anos de 2011 a 2013. Até ao início de Dezembro de 2011 foi apenas realizada a pesquisa bibliográfica, a composição do estado de arte e do procedimento experimental. A campanha experimental teve início em Janeiro de 2012 e prolongou-se até ao final de Setembro. A redação deste trabalho foi finalizada em Março de 2013.

Com a realização deste trabalho foi possível analisar e quantificar a influência da composição da mistura ligante no desempenho de argamassas bastardas, através da execução de 7 formulações distintas com as quais se realizou um total de 126 provetes prismáticos, 21 provetes cilíndricos e 21 provetes em tijolo em mais de 168 amassaduras.



Sobre o comportamento das argamassas no estado fresco destacou-se o facto de as argamassas que possuem maior teor em cimento necessitarem de menos água para obter a mesmo espalhamento que as argamassas com maiores teores em cal aérea, influenciando diretamente a relação água/ligante que vai diminuindo. Observou-se, no entanto, que a trabalhabilidade também diminuiu com a adição de cimento e mantendo o mesmo índice de espalhamento. Observou-se também que houve um aumento da massa volúmica com as sucessivas adições de cimento.

Quanto aos ensaios de natureza mecânica, concluiu-se que as argamassas com maiores teores em cimento são mais resistentes mecanicamente do que as argamassas com maiores teores de cal aérea. Notou-se uma clara relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o teor em cimento da argamassa, verificando-se que quanto maior é o teor em cimento de uma argamassa maior é o módulo de elasticidade, o que se deve à maior rigidez conferida pelo cimento. À medida que a relação água/ligante diminui, aumenta o módulo de elasticidade e aumenta a resistência das argamassas, o que está diretamente relacionado com a diminuição da porosidade. Ao aumentar o teor de cimento, o módulo de elasticidade aumenta, aumentando também a resistência da argamassa.

Em relação aos ensaios de natureza física pode-se observar que a argamassa de 100% de cal aérea (argamassa A) apresenta maior coeficiente de absorver água por capilaridade. Para além disso, verificou-se que aumentando o teor em cimento das argamassas, o teor em água absorvido diminui ligeiramente até aos 180 minutos ( $\approx 13,4 \text{ min}^{0,5}$ ). Registou-se que o teor em cimento é um fator importante no comportamento à água, pois este diminui a absorção de água durante um curto período de tempo, isto é, diminui a velocidade de absorção de água, pois a adição de cimento diminui a dimensão dos poros e assim sendo dificulta a passagem da água (entre os 10-90 min, coeficiente de absorção de água por capilaridade). Em todas as argamassas se verifica que o coeficiente de absorção de água por capilaridade está acima das recomendações.

Em relação à absorção total por capilaridade (24 horas) notou-se que a argamassa B apresenta valores inferiores em relação às restantes argamassas, em todas as idades. Também se constatou que as argamassas E, F e G (20%, 25% e 30% de adição de cimento) têm uma absorção total superior à argamassa de referência (argamassa A) e as restantes argamassas têm valores inferiores a esta.

Quanto à cinética de secagem, concluiu-se que as argamassas com maior teor de cimento (F e G, 25% e 30% de cimento) secam mais lentamente e que as argamassas com as primeiras adições de cimento (B e C, 5% e 10% de cimento) secam mais rapidamente relativamente à argamassa de referência (A, 0% de cimento), apesar de esta ter um coeficiente de capilaridade superior. O índice de secagem aumenta com o aumento do teor em cimento, podendo dizer-se que as argamassas com maior teor em cimento demoram mais tempo a secar do que as argamassas com maior teor em cal aérea.

A permeabilidade ao vapor de água, tendo como referência a argamassa só de cal (argamassa A) apresenta valores aconselháveis para as argamassas A, B, C e D (0%, 5%, 10%, 15% de cimento). Percentagens mais elevadas de cimento afetam a estrutura porosa e a permeabilidade ao vapor de água, fazendo com que a evaporação de água diminua não deixando a parede “respirar”.

Cruzando a tendência de comportamentos face à água, pode-se concluir que a adição de cimento, em pequenas quantidades, é um fator importante no comportamento à água, pois este diminui a absorção de água, mas também diminui a permeabilidade ao vapor de água, o que não é um fator favorável. Conclui-se portanto que para que estes dois fatores convirjam favoravelmente basta a adição de 5% ou de 10% de cimento (argamassas B e C) para que a água absorvida seja mais facilmente dissipada pela evaporação.

A diminuição de porosidade, relacionada com a diminuição da permeabilidade ao vapor de água, pode ter efeitos negativos no comportamento de argamassas em edifícios antigos pois há a necessidade de controlar a humidade no seu interior, que pode ser proveniente do solo ou da utilização do edifício. A diminuição da porosidade também pode ter consequências negativas ao nível da carbonatação da cal, devido à dificuldade da passagem do dióxido de carbono necessário para que a reação se processe, mas tal não se revela de forma significativa para as argamassa B, C e D (5%, 10% e 15% de cimento).

Pode assim dizer-se que as pequenas adições de cimento afetam a resistência da argamassa já que os compostos hidráulicos se formam e a reação de carbonatação da parte do ligante aéreo também se processa. Por outro lado, também se observou nas argamassas com baixa percentagem de cimento que tiveram um bom comportamento no ensaio de envelhecimento artificial.

Conclui-se que a argamassa G (30% de cimento) revela problemas em vários ensaios, nomeadamente ao nível do módulo de elasticidade, das resistências mecânicas, mais elevadas que as recomendações por Veiga (Veiga, et al., 2002) (Tabela 1 e Tabela 2). Também as argamassas E e F (20 e 25% de cimento) apresentam problemas em vários ensaios, mais propriamente de resistência à flexão.

A argamassa D, com 15% de cimento, face aos resultados obtidos, poderá ser aplicada em certos casos de alvenaria de maior resistência, uma vez que o comportamento mecânico e à água não se apresentaram muito desfavoráveis.

As argamassas que apresentaram um melhor comportamento, em termos gerais, foram as argamassas com a adição de 5% e 10% de cimento, argamassas B e C. A absorção de água por capilaridade destas argamassas considerou-se elevada e este fator poderia ser melhorado utilizando uma areia com menor índice de vazios.

A argamassa de referência só de cal, argamassa A, apresentou baixas resistências à flexão e à compressão e elevado índice de coeficiente de absorção de água por capilaridade. O uso de uma areia melhor graduada poderia melhorar o seu comportamento à água e, nomeadamente, a resistência a ciclos climáticos. Para a aplicação em alvenarias antigas o valor baixo do módulo de elasticidade é favorável, sendo que os valores apresentados para as resistências à flexão e à compressão se encontram dentro dos valores aconselháveis para a aplicação em alvenarias antigas (Veiga, 2003).

## VI.2. Propostas para Desenvolvimento Futuro

Tendo em atenção o interesse em aprofundar alguns aspetos relacionados com o estudo da evolução do desempenho de rebocos, identificaram-se alguns domínios no âmbito dos quais será interessante o desenvolvimento de estudos futuros:

- utilizar uma areia com uma curva granulométrica mais adequada, nomeadamente, com menor índice de vazios;
- estudo do comportamento das argamassas estudadas neste trabalho quando sujeitas à influência de sais, nomeadamente, os cloretos;
- estudo microscópico da estrutura e do seu comportamento das argamassas estudadas neste trabalho;
- estudo das argamassas substituindo o cimento Portland utilizado neste ensaio por outros, como por exemplo cimento branco ou cimento de alto forno, e mantendo o traço das argamassas;
- estudo das argamassas substituindo a cal aérea utilizada neste ensaio (Lusical H100- do tipo CL90) por outras, como por exemplo cal hidráulica Martingança, e mantendo o traço das argamassas;
- repetição do estudo efetuado utilizando uma cura seca em vez da cura húmida;
- estudo mais aprofundado da adição de cimento até 15%.



# Bibliografia

**Agostinho, Cláudia. 2008.** Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal aérea. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2008. Tese de mestrado em Engenharia Civil.

**Algarvio, Maria. 2010.** Influência da razão água/ligante nas características das argamassas de cal aérea para rebocos de edifícios antigos. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2010. Tese de mestrado em Engenharia Civil.

**Alves, Ana. 2009.** Reabilitação e Reforço de Pontes de Alvenaria. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2009. Tese de mestrado em Engenharia Civil.

**APFAC. 2008.** Monografias APFAC sobre Argamassas de Construção; Anexo 3. História das Argamassas.

<http://www.apfac.pt/monografias/Monografia%20Rebocos%20e%20Monomassas%20v1Mai08.pdf>. [Online] 2008.

**Botas, Sandro. 2009.** Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios. Lisboa : Universidade Noa de Lisboa, 2009. Tese de mestrado em Engenharia Civil.

**Brito, Vânia. 2009.** Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2009. Tese de mestrado em Engenharia Civil.

**Carvalho, Fernanda; Veiga, Rosário. 1994.** Argamassas de revestimento na reabilitação do património urbano. *2º Encontro sobre conservação e reabilitação de edifícios*. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1994.

**Ciplan. 2011.** [http://www.ciplan.com.br/producao\\_hist\\_cimento.cfm](http://www.ciplan.com.br/producao_hist_cimento.cfm). [Online] Setembro de 2011.

**Costa, J. C. Franco da. 1999.** Materiais de Construção, seu controlo e aplicação em obra. *Materiais de Construção, seu controlo e aplicação em obra*. Lisboa : Laboratório de Engenharia Civil (LNEC), 1999.

**Costa, J.C. Franco da. 1999.** Materiais de construção, seu controlo e aplicação em obra. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1999.

**Coutinho, Joana de Sousa. 2002.** Ciências de Materiais - 1ª Parte (Documento Provisório). 2002.

**Coutinho, Joana. 2006.** Materiais de construção 2. Porto : Universidade do Porto, 2006.

**Cruz, Nuno. 2008.** Estudo da influência da granulometria das areias no desempenho de rebocos de ligante hidráulico. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2008. Tese de mestrado em Engenharia Civil.

**EN 1015-10. 1999.** Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar. s.l. : European Committee for Standardization (CEN), 1999.

**EN 1015-11. 1999.** Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. s.l. : European Committee for Standardization (CEN), 1999.

**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. s.l. : European Committee for Standardization (CEN), 2002.

**EN 1015-19. 1998.** Methods of test for mortar for masonry - Part 19: Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars. s.l. : European Committee for Standardization (CEN), 1998.

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

**EN 1015-21. 2002.** Methods of test for mortar for masonry - Part 21: Determination of the compatibility of one-coat rendering mortars with substrates. s.l. : European Committee for Standardization (CEN), 2002.

**EN 1015-3. 1999.** Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar. s.l. : European Committee for Standardization (CEN), 1999.

**EN 1015-6. October 1998.** European Standard, Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. s.l. : European Committee for Standardization (CEN), October 1998.

**European Mortar Industry Organisation. 2011.** *www.euromortar.com*. [Online] Junho, 2011.

**Fontes, Andreia. 2011.** Influência das condições de cura na carbonatação de argamassas tradicionais com ligante à base de cal aérea. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2011. Tese de mestrado em Engenharia Civil.

**Gomes, Francisco. 2009.** Argamassas pré-doseadas para rebocos de edifícios antigos. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2009. Tese de mestrado em Engenharia Civil.

**Henrique, F.M.A. 1996-2006.** Pedras naturais e artificiais. . *Análise de argamassa, Fichas de Ensaio Fe 01 e 02*. Caparica : Universidade Nova de Lisboa, 1996-2006.

**HOLMSTROM, Ingmar. 1995.** The use of lime, The Historic Scotland Lime Conference. Edinburgh : s.n., 1995.

**Instituto Português da Qualidade (IPQ). 2002.** *Cal de construção. Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade*. Lisboa : IPQ, NP EN 459-1, 2002.

**Lima, Pedro. 2009.** Estudo da influência da mistura ligante no comportamento de rebocos hidráulicos. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2009. Tese de mestrado em Engenharia Civil.

**Lusical. 2011.** <http://www.lusical.pt/>. [Online] Setembro de 2011. [Citação: 23 de Setembro de 2011.]

**Margalha, Maria Goreti. 2010.** Ligantes aéreos minerais. Processos de extinção e o factor tempo na sua. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2010. Tese de doutoramento em Engenharia Civil.

**Margalha, Maria Goreti, Veiga, Maria do Rosário e Brito, Jorge de.** Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea. Lisboa : LNEC.

**Margalha, Maria Goteri. 1997.** "O uso da cal nas argamassas no Alentejo". Évora : Universidade de Évora, 1997. Dissertação de mestrado em Recuperação do Património Arquitectónico e Paisagístico.

**Marques, Ana. 2010.** Argamassas de cal aérea com adição de cinza de casca de arroz. Influência das condições de cura. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2010. Tese de mestrado em Engenharia Civil.

**MARTINEZ, M. Cruz Iglesias e CARRO, Guillermo Alonso. 2007.** Ancient building requirements and the evaluation of different lime-cement mortars compositions. Lisboa : 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção, 2007.

**Martins, André. 2008.** Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2008. Tese de mestrado em Engenharia Civil.

**Martins, João e Paiva, Pedro. 2006.** Ligantes. Materiais de Construção I. Porto : Universidade Fernando Pessoa, 2006.

**NF B 10-511. 1975.** Mesure du module d'élasticité dynamique . s.l. : Associassion Française de Normalisation (AFNOR), 1975.

**NP EN 197-1. 2001.** Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos. 2001.

**NP EN 933-1. 2000.** Ensaios das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica, Método de peneiração. s.l. : Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2000.

**NP-955:1973. 1973.** Inertes para argamassa e betões - determinação da baridade. Lisboa : IPQ, 1973.

**O'HARE, Graham. 1995.** Lime mortars and renders: the relative merits of adding cement, in «Building Conservation Directory». 1995.

**Oliveira, Renata Borges. 2012.** Desempenho de Argamassas com incorporação de Agregados Finos de Vidro - Efeito de Fíler e Pozolânico. Lisboa : Instituto Superior Técnico (IST), 2012.

**Pavão, João. 2010.** Estudo da influência da dosagem de ligante no desempenho de rebocos para edifícios antigos. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2010. Tese de mestrado em Engenharia Civil.

**Penacho, Paulo Medeiros. 2012.** Desempenho de argamassas com incorporação de agregador finos de vidro - Reciclagem de agregados (RCD) e reacção álcalis-sílica (RAS). Lisboa : Instituto Superior Técnico (IST), 2012.

**Penas, Filipa. 2008.** Argamassas de Cal Hidráulica para Revestimentos de Paredes. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2008. Tese de mestrado em Engenharia Civil.

**Rato, Vasco. 2006.** Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas. Lisboa : Universidade Nova de Lisboa, 2006. Tese de doutoramento em Engenharia Civil.

**Santos, Maria. 2009.** Argamassas de revestimento para paredes de edifícios antigos com incorporação de adições pozolânicas. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2009. Tese de mestrado em Engenharia Civil.

**Secil. 2011.** *www.secil.pt*. [Online] Setembro de 2011. [Citação: 23 de Setembro de 2011.]

**Sequeira, C., et al. 2011.** Análise de diferentes ligantes na formulação de argamassas industriais de reabilitação. Portugal : Secil Martingança, 2011.

**Sousa, Rainer. 2011.** <http://www.historiadomundo.com.br/curiosidades/historia-do-cimento.htm>. [Online] Outubro de 2011.

**Veiga, Maria do Rosário. 2005.** Argamassas de cal na conservação de edifícios antigos. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2005.

**Veiga, Maria do Rosário. 2003.** Argamassas para revestimentos de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações mais correntes. *3º Encontro sobre conservação e reabilitação de edifícios*. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2003.

**Veiga, Maria do Rosário. 2003.** As argamassas na conservação - Avaliação e Reabilitação das construções existentes - 1ªs Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2003.

**Veiga, Maria do Rosário. 2005.** Comportamento de rebocos para edifícios antigos: Exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos. *Seminário "Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos"*. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2005.

**Veiga, Maria do Rosário e Carvalho, Fernanda. 2002.** Argamassas de reboco para paredes de edifícios antigos: requisitos e características a respeitar. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2002.

**Veiga, Maria do Rosário e Carvalho, Fernanda R. 1994.** Argamassas de revestimento na reabilitação do património urbano. *2º Encontro sobre conservação e reabilitação de edifícios*. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1994.

**Veiga, Maria do Rosário. 2006.** Intervenções em revestimentos antigos: conservar, substituir ou... destruir. Porto : 2º Encontro sobre Patologias e Reabilitação de edifícios, 2006.



**Veiga, Maria do Rosário, et al. 2004.** Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2004.

**Veiga, Rosário e Carvalho, Fernanda. 2002.** Argamassas de reboco para paredes de edifícios antigos. Revestimentos de paredes em edifícios antigos, Cadernos Edifícios n.º 2. Lisboa : LNEC, 2002.

**Veiga, Rosário, et al. 2004.** Conservação e Renovação de Revestimentos de Paredes de Edifícios Antigos. Edifícios, conservação e reabilitação n.º 9. Lisboa : LNEC, 2004.

**Vitrúvio. 1998.** Os Dez Livros de Arquitectura, tradução de Maria Helena Rua. Lisboa : Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 1998.

**Vitrúvio. 2006.** Tratado de Arquitectura, tradução de M. Justino Maciel. Lisboa : Instituto Superior Técnico, 2006.

**Veiga, Maria do Rosário, et al. 2004.** Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2004.

**Veiga, Rosário e Carvalho, Fernanda. 2002.** Argamassas de reboco para paredes de edifícios antigos. Revestimentos de paredes em edifícios antigos, Cadernos Edifícios n.º 2. Lisboa : LNEC, 2002.

**Veiga, Rosário, et al. 2004.** Conservação e Renovação de Revestimentos de Paredes de Edifícios Antigos. Edifícios, conservação e reabilitação n.º 9. Lisboa : LNEC, 2004.

**Vitrúvio. 1998.** Os Dez Livros de Arquitectura, tradução de Maria Helena Rua. Lisboa : Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 1998.

**Vitrúvio. 2006.** Tratado de Arquitectura, tradução de M. Justino Maciel. Lisboa : Instituto Superior Técnico, 2006.

# Anexos

# 1. Ficha técnica dos ligantes



<b>Granulometria:</b>	
Retido a 125 microns	≤ 0%.
Teor em Água livre	≤ 1%.
Estabilidade (expansão)	≤ 0,2%.
Teor em Ca(OH) <sub>2</sub>	≥ 93%.
Teor em MgO	≤ 3%.
Densidade aparente na ordem de	0,5.

## Lusical H100

### DESCRIÇÃO

A **Lusical H100** é uma cal de construção utilizada como ligante, individual ou incorporada nas misturas formuladas.

E é aplicada principalmente nos rebocos, e numa forma geral na construção civil.

### CARACTERÍSTICAS FÍSICAS e QUÍMICAS

Determinadas pelos métodos Laboratório Grupo em conformidade com os modos operatórios normalizados

Nos produtos formulados,

- a granulometria da **Lusical H100** otimiza a eficácia do produto acabado.

- sua brancura garante uma qualidade constante dos rebocos.

- seu forte teor em hidróxido de cálcio dá ao reboco a trabalhabilidade e sua permeabilidade ao ar

### DOSAGEM e APLICAÇÃO

A **Lusical H100** é entregue sob a forma pulverulenta. Sua dosagem é feita a partir do silo de armazenamento.

Ela é extraída do silo com a ajuda de equipamentos de descolmatção como fundos vibrantes, canhões de ar, ou desagregadores rotativos.

O produto é transportado por parafusos sem fim.

Os materiais de dosagem devem ter em conta as características físicas do produto - densidade, fluidez - respondendo às exigências de precisão requeridas.

### CONDICIONAMENTO

Entregue em saco, big-bag e em sistema, a **Lusical H100** é armazenada em silos estanques.

### DADOS de SEGURANÇA

Ficha de segurança: Hidróxido de Cálcio.

O produtor garante que todas as diligências são efectuadas para o respeito dos critérios definidos. No entanto, trata-se de produtos naturais que podem apresentar ligeiras variações nas características físico-químicas sem incidência notável sobre a qualidade do produto

**LUSICAL**

F.P. 351 - CH 01 B - 06 / 2010



01-06-2010

Valverde—2025-201 Alcanede - Portugal  
Telefone (+351)243 409 040: - Fax (+351) 243 400 474—E-mail: info.lusical@lhoist.com

(Lusical, 2011)

# CEM II/B-L 32,5N

Cimento Portland de Calcário



## Locais de Produção

Fábrica Secil-Outão  
Fábrica Cibra-Pataias  
Fábrica Maceira-Liz

## Principais Aplicações

## Principais Características

## Advertências Específicas

## Informação de Segurança

Última actualização

## Embalagem

Granel  
Sacos de 40kg  
Sacos de 25kg

## Certificação

Cimento certificado segundo a NPEN 197-1.  
Certificados de Conformidade 0856-CPD-0130, 0856-CPD-0131 e 0856-CPD-0132.

## Composição do Produto (Núcleo Cimento)

65% a 79% Clínquer Portland  
21% a 35% Calcário  
0% a 5% Outros Constituintes

O Cimento Portland de Calcário CEM II/B-L 32,5N é o cimento mais utilizado nas obras de construção civil. A sua excelente trabalhabilidade e baixo calor de hidratação tornam-no especialmente adaptado a todos os trabalhos correntes da construção.

O cimento CEM II/B-L 32,5N é principalmente utilizado em:

- argamassas e betão não armado para enchimentos e regularização;
- betão estrutural, pronto ou fabricado em obra de média resistência;
- argamassas de assentamento, reboco e reparação;
- fundações directas e indirectas em ambientes moderadamente agressivos;
- estabilização de solos e solo-cimento;
- prefabricação de blocos, tubos, manilhas e outros artefactos à base de cimento;
- prefabricação ligeira em regime de baixa rotatividade de moldes.

Cimento de cor cinzenta, com menor calor de hidratação e melhor trabalhabilidade que um cimento CEM I da mesma classe de resistência.

Desenvolvimento mais lento de resistências (menor resistência inicial).

Resistências finais dentro dos valores da classe indicada (resistências aos 28 dias).

Este cimento melhora a trabalhabilidade de betões e argamassas e permite uma redução da dosagem de água de amassadura. Porém, o correcto desenvolvimento de resistências é sensível ao processo de cura pelo qual deverão ser tomadas precauções para evitar a dissecação de peças betonadas muito expostas ao sol e ao vento (possível fendilhação).

Não se recomenda a utilização deste cimento em tempo muito frio, sem que se tomem medidas adequadas.

O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele. Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras para protecção respiratória, luvas de protecção das mãos, óculos de protecção dos olhos e fato de trabalho para protecção da pele.

Para informação detalhada consulte a Ficha de Dados de Segurança deste produto.

Setembro 2004 - Versão 3

pag. 1 | 2

### Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Teor de Sulfatos (em SO <sub>3</sub> )	NP EN 196-2	≤ 3,5%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

(1) As percentagens são referidas à massa de cimento.

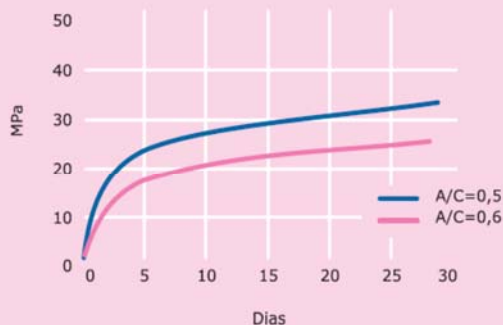
### Características Mecânicas

Resistência à Compressão (MPa)				
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	NP EN 196-1	
2 dias	7 dias			28 dias
-	≥ 16			≥ 32,5 e ≤ 52,5

### Características Físicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 75 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m<sup>3</sup> de cimento CEM I/B-L 32,5N



Habitação a custos controlados.  
Quinta da Cabrinha, Lisboa.



Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.

Direção Comercial  
Av. das Forças Armadas, 125 6º  
1600-079 LISBOA  
Tel. 217 927 100 . Fax. 217 936 200

Vendas Norte  
Tel. 226 078 410 . Fax. 226 078 411

Vendas Centro  
Tel. 244 779 500 . Fax. 244 777 455

Vendas Sul  
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

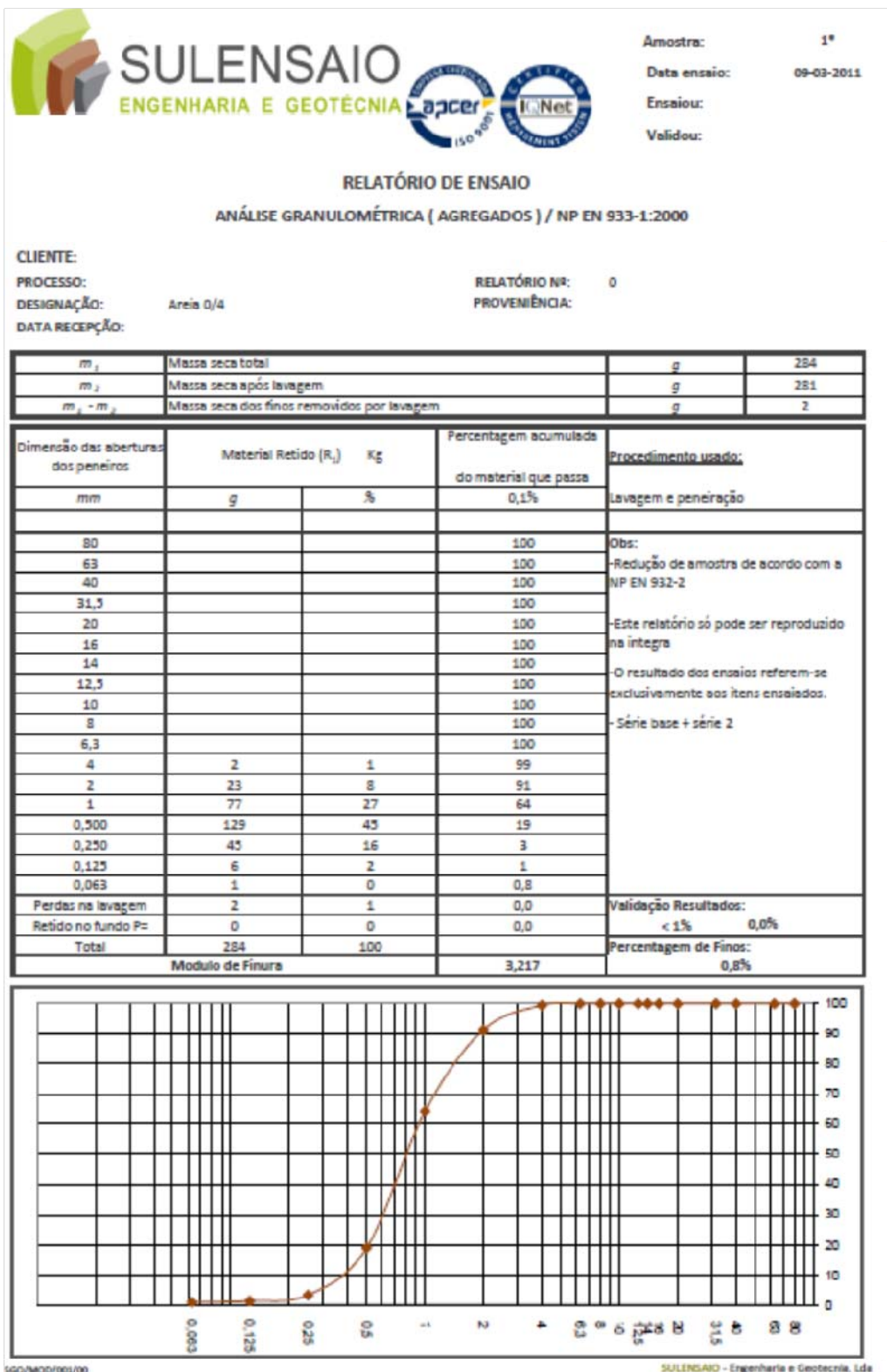
Cimento Branco  
Tel. 244 587 700 . Fax. 244 589 652

Departamento Técnico-Comercial  
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229


E-mail - comercial@secil.pt  
Site - www.secil.pt

## 2. Areia

### 2.1. Análise granulométrica da areia



## 2.2. Ficha técnica do agregado

 Número de Identificação do Organismo Notificado nº 1515				
<b>MIRATERRAPLANAGENS</b> Casal do Montalvo – Apartado nº 4 2250-909 Constância 08 N.º 1515-CPD-0141				
NP EN 12620:2002+A1:2010; NP EN 13139:2005/AC:2010; NP EN 13043:2004 (Ed.1); NP EN 13242:2002+A1:2010				
Origem	"MiraterraPlanagens", Pedreira de Areia nº6			
Designação do agregado/ Dimensões do agregado	Areia 0/4 / (0/4)			
Descrição Petrográfica	Quartzo Translúcido (76.3%), Quartzo Leitoso (15.4%), Litoclastos (3.1%), Mica Preta (0.8%), Mica Branca (0.7%), Quartzo Rosa e Citrino (3.7%)			
Categoria Granulométrica	Gf85-GA85-Gf85-0/4			
Peneiro Intermédio	NA-G <sub>TC</sub> 20-GT <sub>r</sub> 10-NA			
Tolerância Granulométrica	Peneiros (mm)	Curva Típica(% passados)	Tolerância (% passados)	
			Valor Min.	Valor Máx.
	8	100	100	100
	6,3	100	98	100
	4	99	94	100
	2	92	82	100
	1	68	48	88
	0,5	32	---	---
	0,250	4	0	24
	0,125	0	---	---
	0,063	0,1	0	3
<b>Limpeza</b>				
Teor de finos	NPEN 933-1	C	f3-f3-f3/Categoria 1	
Qualidade dos finos	NPEN 933-8	VL Va/r ≥	95%	
	NPEN 933-9	VL Va/r ≤	DND	
Massa Volúmica " Partículas Secas em estufa"	NPEN 1097-6	VD	2,63 Mg/m <sup>3</sup>	
Massa volúmica "Material Impermeável"	NPEN 1097-6	VD	2,66 Mg/m <sup>3</sup>	
Massa volúmica "Partículas Saturadas"	NPEN 1097-6	VD	2,64 Mg/m <sup>3</sup>	
Absorção de água	NPEN 1097-6	VD	0,4 %	
Baridade	NPEN 1097-3	VD	DND	
<b>Composição/teor</b>				
Cloretos	NPEN 1744-1	VD	< 0,01%	
Sulfatos solúveis em ácido	NPEN 1744-1	C	DND	
Enxofre total	NPEN 1744-1	Va/r < 1%	0,070%-S1-NA-0,070%	
<b>Constituintes que alterem a velocidade de hidratação e a resistência do betão</b>				
Teor de Húmus	NPEN 1744-1	Va/r	Solução mais débil que a SP	
Ensaio tempo de presa	NPEN 1744-1	Va/r < 120 min	DND	
Resistência à Compressão	NPEN 1744-1	Va/r < 20 S(%)	DND	
<b>Teor de carbonato</b>	NPEN 1744-1/NPEN196-21	VD	DND	
<b>Estabilidade volumétrica</b>				
Retracção por secagem	NPEN 1367-4	Va/r < 0,075 %	0,012%	
Emissão radioactiva		VD	DND	
Libertação de metais pesados		VL	DND	
Libertação de compostos de carbono poliaromáticos		VL	DND	
Libertação de outras substâncias perigosas		VL	DND	
Durabilidade face à reacção álcalis-silica	NPEN 1367-5	VD	DND	

VD – Valor Declarado; C - Categoria Va/r – Valor de aceitação rejeição; VL – Valor Limite; DND – Desempenho Não Determinado

Data de Aprovação: 14-10-2011

Aprovado:

