



RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO DE BETÕES ESTRUTURAIS DE AGREGADOS LEVES

Bernardo Teixeira Ferreira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

ENGENHARIA CIVIL

Orientador: Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Júri

Presidente: Professor Doutor Augusto Martins Gomes

Orientador: Professor Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Vogal: Professor Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Outubro de 2015



Resistência à carbonatação de betões leves estruturais de agregados leves

Bernardo Teixeira Ferreira

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Dissertação elaborada no âmbito do Projecto FCT *EELWAC*

Durability and lifetime of more energy efficient structural lightweight aggregate
concrete

Task 3 – Durability of structural lightweight aggregates concrete –
Laboratory tests

Projecto FCT PTDC/ECM-COM/1734/2012



União Europeia
FEDER



Governo da República Portuguesa

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR

Portugal

Resumo

Esta dissertação tem como objectivo caracterizar a resistência à carbonatação em betões estruturais de agregados leves (BEAL), recorrendo a diferentes tipos de agregados leves, tipos de ligante e várias relações água/ligante (a/l). Este estudo tem como base uma extensa campanha experimental que abrange a realização de ensaios de caracterização mecânica (resistência à compressão) e de durabilidade (resistência à carbonatação).

As composições produzidas englobam 4 tipos de agregados leves, com porosidades diversas, e 1 tipo de agregado de massa volúmica normal, empregue na produção das misturas de referência. Consideram-se, nas referidas misturas, 3 tipos de relações a/l (0,35; 0,45 e 0,55), bem como 9 tipos de ligantes (CEM I; CEM II/A-D(1); CEM II/A-D(2); CEM II/A-V; CEM II/B-V; CEM II/A-L; CEM II/B-L; CEM IV/A e CEM IV/B).

Verifica-se que a resistência à compressão é inferior para os BEAL relativamente aos BAN de igual composição, sendo que esta redução tende a aumentar com a diminuição da relação a/c e da massa volúmica dos agregados leves. Relativamente às classes de resistência, produziram-se misturas com classes de LC12/13 a LC40/46 e de C12/15 a C45/55 nos BEAL e BAN, respectivamente.

Encontra-se associada ao incremento da relação a/l , para misturas análogas, uma redução da resistência à carbonatação. A utilização de adições conduziu, na vasta maioria dos casos, a uma redução da resistência à carbonatação, verificando-se um maior decréscimo associado a maiores percentagens de substituição de cimento por adições. Registaram-se, para as relações a/l de 0,45 e 0,55, reduções na resistência à carbonatação nos BEAL face aos BAN, sendo que, nas misturas mais porosas ($a/l=0,65$), tal não se verificou.

Palavras-chave:

Durabilidade, Resistência à carbonatação; Betões de agregados leves estruturais

Abstract

This research aims to characterize the resistance of lightweight aggregate concrete (LWAC) to carbonation, produced with different types of lightweight aggregates, various cementitious materials and several water/binder ratios (w/b). This study is based on extensive experimental campaign which comprises carrying out mechanical (compression strength) and durability characterization tests (accelerated carbonation test).

The mixtures produced include four types of lightweight aggregates with different porosities, and one type of normal weight aggregate used in the production of reference concretes. In the referred mixtures three w/b ratios (0.35, 0.45 and 0.55 and 9 types of binders (CEM I, CEM II/AD(1); CEM II/AD(2); CEM II/AV; CEM II/BV; CEM II/ L; CEM II/ L; CEM IV/A; CEM IV/B) were considered.

It is found that the compressive strength is lower for LWAC, relatively to the same NWC mixture, and that this reduction tends to increase as the w/b ratios and the lightweight aggregate density decrease. Referring to the compressive strength, it was possible to produce concretes with compressive strength classes from LC12/13 to LC40/46 and C12/15 to C45/55, in LWAC and NWC, respectively.

For similar mixtures, an increment in w/b ratio is associated with a reduction of resistance to carbonation. In the vast majority of cases, the use of additions led to a reduction of resistance to carbonation, verifying a greater decrease linked to a higher percentage of cement replacement. For w/b ratios from 0.45 to 0.55, there was a reduction in resistance to carbonation in LWAC relatively to NWC. This fact couldn't be proven for mixtures with the highest w/b ratio (0,65).

Keywords:

Durability, Carbonation resistance; Lightweight aggregate concrete

Agradecimentos

Aos meus pais, um profundo e sentido obrigado. Obrigado por todo o apoio, força e confiança que sempre me transmitiram. A sua ajuda foi imprescindível e sem ela não teria sido capaz de transpor todas as barreiras que a vida me colocou.

À minha família, em especial ao meu irmão Guilherme, por todo o apoio ao longo desta jornada académica.

À minha namorada Melissa, um especial agradecimento por me ter acompanhado, mais do ninguém, ao longo deste trajecto. As palavras não são capazes de traduzir todo o apreço e gratidão que sinto.

Aos plebeus e Repúblicos da República do Santo Condestável pelos excelentes momentos juntos passámos e pela ajuda na adaptação a uma nova fase da minha vida. O companheirismo e fraternidade que me transmitiram são valores que vou para sempre guardar e prezar.

Aos elementos da equipa de Futsal do Instituto Superior Técnico, por todo o esforço e dedicação em função de um objectivo comum, mas acima de tudo um agradecimento especial pela forma como sempre fomos capazes de nos apoiar e motivar mutuamente em todos os aspectos das nossas vidas.

Ao Professor Alexandre Bogas, pela exigência e motivação que sempre me transmitiu. A sua dedicação, disponibilidade e conhecimento foram vitais e imprescindíveis para a realização deste projecto.

A toda a equipa técnica do Laboratório de Construção do Departamento de Eng. Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico, em especial ao Sr. Leonel Pontes e João Lopes, pela disponibilidade e serviço de missão que sempre demonstraram.

Aos meus companheiros de curso e de investigação, João Maria, João Rodrigues, Nuno Reis, João Vinagre, Fábio Coelho, Sérgio Louro, João Cortês, Jorge Pontes, Sofia Real, Alexandre Silva, Patrícia Gameiro, Tiago Gomes, Tiago Barroqueiro e Diogo Pedro, pela ajuda, conhecimento e, acima de tudo, pela amizade.

Acrónimos

BEAL – Betão estrutural de agregados leves

BAN – Betão de agregados normais

a/c – Relação água / cimento

a/l – Relação água / ligante

SF – Sílica de fumo

CZ – Cinzas volantes

FL – Filler calcário

Abaix. - Abaixamento

Simbologia

kg - Quilograma

µm - Micrómetro

mm - Milímetro

cm - Centímetro

m - Metro

m³- Metro cúbico

l - Litro

h - Hora

min - Minuto

s - Segundo

pH - potencial de hidrogénio

°C - Grau Celsius

Mpa - Mega Pascal

KN - Quilo Newton

f_{c28d} - Resistência à compressão aos 28 dias

f_{c28d} / ρ_{seca} - Eficiência estrutural

ρ - Massa volúmica

ρ_{fresca} - Massa volúmica fresca

ρ_{seca} - Massa volúmica seca

x_c - Profundidade de carbonatação

k_c - Coeficiente de carbonatação

C-S-H - Silicato de cálcio hidratado

Índice de texto

1	Introdução	1
1.1	Considerações gerais	1
1.2	Objectivos.....	2
1.3	Metodologia e organização do trabalho.....	2
2	Estado da Arte.....	4
2.1	Introdução	4
2.2	Betão Estrutural de Agregados Leves	4
2.3	Durabilidade	7
2.3.1	Carbonatação	8
2.4	Durabilidade nos BEAL.....	17
2.4.1	Carbonação nos BEAL.....	19
3	Campanha Experimental.....	22
3.1	Introdução	22
3.2	Descrição da campanha experimental.....	22
3.3	Estudo e formulação das misturas	23
3.3.1	Materiais	23
3.3.2	Composição das misturas	29
3.4	Produção do betão e preparação dos espécimes.....	32
3.4.1	Produção do betão.....	32
3.5	Caracterização do betão em estado fresco	35
3.5.1	Ensaio de abaixamento.....	35
3.5.2	Massa volúmica	35
3.6	Caracterização do betão em estado endurecido.....	35

3.6.1	Massa volúmica	36
3.6.2	Resistência à compressão	36
3.6.3	Resistência à carbonatação em câmara acelerada.....	37
4	Apresentação e discussão de resultados	40
4.1	Caracterização dos betões em estado fresco.....	40
4.2	Resistência à compressão e massa volúmica	43
4.3	Resistência à carbonatação.....	46
4.3.1	Discussão de resultados	51
5	Conclusões.....	71
5.1	Considerações finais.....	71
5.2	Conclusões gerais	71
5.3	Propostas para desenvolvimento futuro	75
	Bibliografia.....	76
	Livros, artigos e dissertações	76
	Normas e especificações.....	80
	Anexos.....	A

Índice de figuras

Figura 2.1 - Variação da massa volúmica de betões leves em função dos agregados utilizados (Bogas, 2011)	5
Figura 2.2 - Resumo esquemático dos diversos tipos de agregados leves.....	6
Figura 2.3 – Esquematização do processo de difusão de dióxido de carbono num betão (Bogas, 2011)	10
Figura 2.4 – Taxa de carbonatação em função da humidade relativa, (Tuutti, 1982)	14
Figura 2.5 – Taxa de corrosão em função da humidade relativa (Page,1992)	17
Figura 2.6 – Libertação de água pelos agregados leves saturados após 4 e 21 horas a mistura (Maruyama et al, 2009)	20
Figura 3.1 – Curvas granulométricas das areias naturais.....	25
Figura 3.2 – Curvas granulométricas dos agregados naturais calcários	26
Figura 3.3 – Curvas granulométricas dos agregados leves: Leca, Stalite e Lytag.....	26
Figura 3.4 - Curvas granulométricas dos agregados leves: Argex 2-4 e Argex 3-8F.....	27
Figura 3.5 - Betoneira utilizada na campanha experimental	33
Figura 3.6 – Vibrador de agulha	34
Figura 3.7 – Cura dos provetes em câmara húmida.....	34
Figura 3.8 – Armazenamento dos provetes em câmara seca.....	35
Figura 3.9 – Equipamento utilizado para o ensaio de massa volúmica em estado endurecido .	36
Figura 3.10 – Prensa TONI PACT 3000	36
Figura 3.11 – Provede de betão após o ensaio de resistência à compressão	37
Figura 3.12 – Câmara onde se realizou o ensaio de resistência à carbonatação	37
Figura 3.13 – Equipamento para divisão em duas metades de um provede.....	38
Figura 3.14 – Malha utilizada para a divisão final dos espécimes	38
Figura 3.15 – Resultado final do ensaio de resistência à profundidade de carbonatação	39

Figura 4.1 - Variação da resistência à compressão em função do tipo de ligante relativamente a betões do tipo CEM I, $a/l=0,45$	44
Figura 4.2 - Variação da resistência à compressão em função do tipo de ligante relativamente a betões do tipo CEM I, $a/l=0,55$	44
Figura 4.3 - Variação da resistência à compressão em função do tipo de ligante relativamente a betões do tipo CEM I, $a/l=0,65$	45
Figura 4.4 - Coeficientes de carbonatação em betões do tipo CEM I	50
Figura 4.5 - Coeficientes de carbonatação em betões com adição de sílica de fumo	50
Figura 4.6 - Coeficientes de carbonatação em betões com adição de cinzas volantes	50
Figura 4.7 - Coeficientes de carbonatação em betões com adição de filler calcário	51
Figura 4.8 - Coeficientes de carbonatação em betões com misturas ternárias	51
Figura 4.9 – Frente de carbonatação em redor das partículas de agregado leve	52
Figura 4.10 - Ilustração esquemática da participação dos agregados na difusão de CO_2 na região afectada pelo efeito de parede junto às faces moldadas.....	53
Figura 4.11 – Modelo bifásico proposto	54
Figura 4.12 - Evolução da profundidade de carbonatação no betão CEM I, $a/c=0,45$	54
Figura 4.13 - Evolução da profundidade de carbonatação no betão CEM I, $a/c=0,55$	56
Figura 4.14 - Evolução da profundidade de carbonatação no betão CEM I, $a/c=0,65$	56
Figura 4.15 – Evolução da profundidade de carbonatação no betão CEM II/A-V, $a/l=0,65$	57
Figura 4.16 – Definição matemática do ponto de transição para o betão do tipo CEM I produzido com Stalite, $a/c=0,45$	58
Figura 4.17 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a relação a/c para betões do tipo CEM I	60
Figura 4.18 - Comparação dos resultados obtidos para betões do tipo CEM I por Bogas (2011)	61
Figura 4.19 – Coef. de carbonatação vs % de substituição por sílica de fumo ($a/l=0,45$).....	61
Figura 4.20 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por sílica de fumo ($a/l=0,55$).....	61

Figura 4.21 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por sílica de fumo ($a/l=0,65$).....	62
Figura 4.22 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por cinzas volantes ($a/l=0,45$)	63
Figura 4.23 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por cinzas volantes ($a/l=0,55$)	63
Figura 4.24 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por cinzas volantes ($a/l=0,65$)	63
Figura 4.25 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por filler calcário ($a/l=0,45$).....	64
Figura 4.26 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por filler calcário ($a/l=0,55$).....	64
Figura 4.27 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por filler calcário ($a/l=0,65$).....	64
Figura 4.28 - Relação entre os coeficientes de carbonatação, K_c , e a relação a/c , para betões produzidos com agregado normal e vários tipos de ligante.....	66
Figura 4.29 - Relação entre os coeficientes de carbonatação, K_c , e a relação a/c , para betões produzidos com Stalite e vários tipos de ligante	67
Figura 4.30 - Relação entre os coeficientes de carbonatação, K_c , e a relação a/c , para betões produzidos com Leca e vários tipos de ligante.....	67
Figura 4.31 – Relação entre a resistência média aos 28 dias e o coeficiente de carbonatação	70

Índice de quadros

Quadro 2.1 - Propriedades de betões leves em função do agregado, (Adaptado de Neville e Brooks, 2013)	6
Quadro 3.1 - Identificação dos agregados utilizados.....	24
Quadro 3.2 - Identificação do cimento, adições e adjuvante	24
Quadro 3.3 - Resultados obtidos para a peneiração dos agregados	25
Quadro 3.4 - Propriedades físicas dos agregados de massa volúmica normal.....	28
Quadro 3.5 - Propriedades físicas dos agregados leves	28
Quadro 3.6 – Características do cimento e adições utilizadas	29
Quadro 3.7 – Ficha técnico do cimento CEM I 42,5 R.....	29
Quadro 3.8 - Tipos de ligantes adoptados para a campanha experimental	30
Quadro 3.9 – Composição das misturas.....	31
Quadro 4.1 – Características físicas e mecânicas dos betões no estado fresco.....	40
Quadro 4.2 - Resultados dos ensaios de resistência à profundidade de carbonatação ($a/c=0,45$)	47
Quadro 4.3 - Resultados dos ensaios de resistência à profundidade de carbonatação ($a/c=0,55$)	48
Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios de resistência à profundidade de carbonatação ($a/c=0,65$)	49
Quadro 4.6 - Resumo dos coeficientes obtidos através do modelo bifásico	57
Quadro 4.7 – Valores indicativos de $RC65$ de acordo com o fib34 (2006), ($\text{kg}\cdot\text{ano}/\text{m}^5$).....	61
Quadro 4.8 – Estimado do número de anos necessários para se atingirem diferentes espessuras de carbonatação para os betões do tipo CEM I	69
Quadro 4.9 - Coeficiente de variação das medições em função da duração do ensaio	69

1 Introdução

1.1 Considerações gerais

Actualmente, regista-se uma tendência global que promove uma mudança de paradigma, dando-se especial enfoque a questões que anteriormente eram largamente descuidadas e, por vezes, até ignoradas. A preocupação com a durabilidade e sustentabilidade tornou-se uma questão central no modo em como o ser humano desenvolve as suas actividades.

Naturalmente, a Engenharia Civil como um dos esteios de uma sociedade moderna não é excepção e deve assumir, como até aqui tem feito, um papel preponderante neste novo caminho. O espírito de descoberta e de inovação que caracterizam a construção civil faz com que se encare este novo desafio de forma bastante directa e esclarecida. Assim, faz todo o sentido que uma das vias para a promoção da sustentabilidade na construção incida sobre o material estrutural mais utilizado a nível mundial, o betão armado. Neste contexto, sentido é importante que se explorem soluções alternativas, sendo um desses exemplos os betões de agregados leves.

O recurso a betão estrutural de agregados leves (BEAL), devido às suas características, tais como a reduzida massa volúmica relativamente ao betão dito convencional, reduz as cargas actantes, promovendo o aparecimento de novas soluções estruturais quer ao nível das novas construções, quer ao nível da reabilitação. Do ponto de vista económico, embora os BEAL estejam associados a maiores custos iniciais, os custos relacionados com o transporte, demolição e, principalmente, exploração ao longo da vida útil podem justificar a viabilidade da utilização de betões leves estruturais.

Até aos dias de hoje, um dos maiores entraves à implementação alargada de betões estruturais leves no sector da construção, devia-se à falta de conhecimento das propriedades deste tipo de betão, bem como o seu desempenho a longo prazo. Existem testemunhos, desde a antiguidade, da adequada durabilidade dos BEAL, como é exemplo da cúpula do Panteão de Roma, que ainda hoje persiste sem grandes danos. Outros exemplos são reportados pelo elevado desempenho que estruturas em BEAL têm evidenciado em ambientes extremamente agressivos de ambiente marítimo no Norte da América e Norte da Europa. Porém, é também reconhecido que os agregados leves apresentam maior porosidade do que a pasta circundante, o que leva algumas normas a especificar os BEAL com medidas mais conservativas, nomeadamente no que concerne à resistência à carbonatação (Holm e Bremner 2000, Bogas 2011). Sobretudo, existe ainda uma grande desconfiança e menor certeza na utilização e percepção da potencial durabilidade dos BEAL.

A carbonatação, a par do ataque de cloretos, é considerada um dos principais mecanismos de degradação do betão (Mehta e Monteiro 2006). Em alguns casos, a progressão

da frente de carbonatação associada à corrosão das armaduras poderá conduzir ao fim da vida útil da estrutura. Por isso, torna-se fundamental compreender em que medida este tipo de mecanismo de degradação é influenciado pelo tipo de agregado e quais as principais diferenças no comportamento dos BEAL relativamente aos betões convencionais. É neste âmbito, e com este intuito, que se desenvolve o presente trabalho cujo objectivo fundamental consiste em caracterizar a resistência à carbonatação de betões estruturais de agregados leves produzidos com vários tipos de agregado leve e tendo em consideração diferentes composições de modo a abranger os BEAL de utilização mais corrente.

1.2 Objectivos

O presente trabalho tem como principal objectivo a caracterização da durabilidade de betões estruturais produzidos com agregados leves, tendo apenas em consideração a componente relacionada com a resistência à carbonatação. Este trabalho enquadra-se no projecto de investigação que se tem desenvolvido no Instituto Superior Técnico desde 2013 e que visa exactamente o estudo da “Durabilidade e vida útil de betões estruturais de agregados leves energeticamente mais eficientes”.

De modo a cumprir os objectivos do presente documento, definiu-se uma extensa campanha experimental que envolveu a caracterização de betões produzidos com 4 tipos de agregado leve e 1 tipo de agregado de massa volúmica normal, bem como o recurso a 9 tipos de tipos de ligantes correntes definidos na norma NP EN 197-1, nomeadamente: CEM I 42,5R; CEM II/A-D (6% e 9% SF); CEM II/A-V (15% CZ); CEM II/B-V (30% CZ); CEM II/A-L (15% FL); CEM II/B-L (30% FL); CEM IV/A (10% SF e 20% CZ); CEM IV/B (10% SF e 40% CZ). Foram realizados ensaios de caracterização do betão no estado fresco (massa volúmica e abaixamento) e no estado endurecido (massa volúmica, resistência à compressão e resistência à carbonatação). De modo a abranger uma vasta gama de betões correntes, foram ainda consideradas argamassas de diferente compacidade, para relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65.

Em resumo, o presente trabalho procura compreender o modo como se processa o mecanismo de carbonatação nos BEAL, tendo em consideração a influência de diferentes parâmetros, como o tipo de agregado, relação a/l e tipo de ligante. No final deste estudo visa-se dotar o meio técnico Nacional e Internacional de informação relevante que contribua para uma melhor aceitação e confiança na utilização dos BEAL.

1.3 Metodologia e organização do trabalho

A elaboração deste documento foi o culminar de quatro etapas distintas. Em primeiro lugar, desenvolveu-se o trabalho relacionado com a pesquisa bibliográfica e de recolha de informação, de modo a serem adquiridos os conhecimentos necessários para a compreensão do tema em estudo.

A segunda etapa teve como objectivo a definição total da campanha experimental, tendo sido efectuada uma planificação dos procedimentos a realizar, entre os quais as betonagens e os ensaios de caracterização, bem como da definição de todas as provisões necessárias ao seu bom funcionamento.

Posteriormente, procedeu-se à implementação dos processos anteriormente definidos para a campanha experimental. Inicialmente, efectuaram-se os ensaios de caracterização dos agregados, procedendo-se, em seguida, aos ensaios relacionados com a análise do betão no estado fresco e no estado endurecido.

Finalmente, a última etapa consistiu na análise e discussão dos resultados obtidos ao longo de toda a campanha experimental.

Este documento é constituído por cinco capítulos, tendo sido estruturado deste modo de forma a melhor se transmitir o trabalho realizado, sendo que o primeiro e último capítulo são, respectivamente, a introdução e a conclusão.

No capítulo 2, apresenta-se um breve resumo do actual estado de conhecimento da durabilidade dos betões estruturais de agregados leves (BEAL), focando, fundamentalmente, a resistência à carbonatação. Primeiro, procedeu-se à definição das características que definem os BEAL, abordando também as características dos agregados leves capazes de produzir betões estruturais. Seguidamente, é abordado o mecanismo de carbonatação nos betões em geral, apontando as diversas condicionantes que tomam parte neste processo. Por fim, discute-se a durabilidade nos BEAL, salientando-se os principais aspectos reportados na literatura que tornam diferente o seu desempenho à carbonatação face aos betões convencionais.

No terceiro capítulo, faz-se uma descrição detalhada da campanha experimental, fazendo referência às composições das misturas, processo de amassadura, produção de provetes e procedimentos de ensaio.

No capítulo 4, procedeu-se à apresentação e à análise de todos os resultados decorrentes da campanha experimental. Esta análise foi bastante abrangente, incluindo o estudo da influência dos factores de composição mais relevantes, como o tipo de agregado, a relação a/l ou tipo de ligante.

Por fim, no quinto capítulo, apresentam-se as principais conclusões obtidas ao longo da realização deste trabalho, tecendo-se, ainda, algumas considerações sobre propostas de desenvolvimento futuro.

2 Estado da Arte

2.1 Introdução

Este capítulo tem como principal objectivo apresentar o estado actual da investigação relativa à durabilidade de betões produzidos com agregados leves, nomeadamente no que se refere à resistência à profundidade de carbonatação. Para o efeito, apresenta-se um resumo do estado da arte, onde se enumeram os resultados obtidos por diversas campanhas experimentais relevantes e procede-se à descrição e análise de diversos conceitos estruturantes.

A evolução e desenvolvimento económico da sociedade permitiu um maior acesso da população a diversos tipos de serviços e bens de consumo. Associado a este aumento e à melhoria das condições de vida, verificou-se uma degradação das condições ambientais, entre as quais se encontra o aumento dos níveis de concentração de CO₂ na atmosfera. Deste modo, é importante analisar a resistência à carbonatação dos betões, dado que, em alguns casos, pode comprometer a vida útil das estruturas. De acordo com Lo et al (2008), o mecanismo de carbonatação apresenta-se como uma das principais causas de deterioração em betão armado.

A utilização de agregados leves na produção de betões estruturais não representa, por si só, uma inovação da tecnologia da construção. De facto, várias civilizações antigas – como os Sumérios, Gregos e Romanos – recorreram a agregados naturais de origem vulcânica para erguer algumas das mais icónicas estruturas, entre as quais o Coliseu de Roma e a Basílica de Santa Sofia em Istambul.

Devido às vantagens práticas decorrentes da utilização de betões estruturais de agregados leves (BEAL), estes têm vindo a assumir um papel mais activo na indústria dos betões estruturais, pelo que têm aumentado significativamente os recursos empregues na investigação e desenvolvimento de novas soluções desta natureza (Chandra e Berntsson, 2003).

2.2 Betão Estrutural de Agregados Leves

Como o próprio nome indica, os betões leves (BL) apresentam menor peso específico do que os betões convencionais. O recurso a técnicas de produção de betão leve permite a obtenção de valores de massa volúmica compreendidos entre cerca de 300 e 1850 kg/m³ (Neville e Brooks, 2013). De acordo com a norma europeia NP EN 206-1 (2008), o betão leve estrutural deverá apresentar massa volúmica seca entre 800 e 2000 kg/m³. Segundo Bogas (2011), a variação desta propriedade deve-se, fundamentalmente, às características do agregado (tipo, volume, teor em água, absorção), sendo ainda influenciada pela compactação, condições de cura, teor em cimento e relação a/c.

É importante referir que existem diversos tipos de betão leve que são categorizados em função do respectivo método de produção. Destacam-se três técnicas: a incorporação de agregados leves na pasta cimentícia, a introdução de vazios no betão e a exclusão de agregados finos da mistura, que originam, respectivamente, betão de agregados leves, betão celular e betão sem finos (Neville e

Brooks, 2013). No entanto, apenas nos casos em que se utilizam agregados leves é possível a obtenção de betões leves estruturais.

A massa volúmica dos betões é, essencialmente, “controlada” pelo volume de agregados que, genericamente, ocupam cerca de 70% do volume do betão (FIP 1983). Assim sendo, é possível estabelecer um paralelo entre o tipo de agregado e a variação da massa volúmica em betões leves, como ilustra a Figura 2.1.

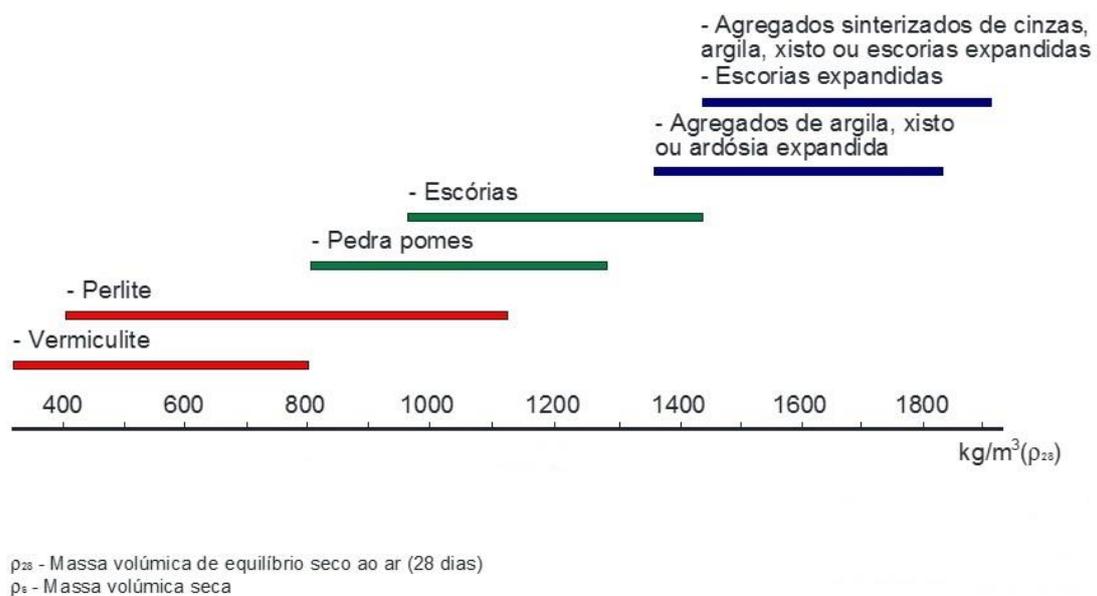


Figura 2.1 - Variação da massa volúmica de betões leves em função dos agregados utilizados (Bogas, 2011)

Torna-se, então, pertinente tecer algumas considerações sobre a gama e a natureza dos agregados actualmente disponíveis. As diferenças surgem a vários níveis, como por exemplo, ao nível da sua constituição, origem e método de produção. Os agregados leves podem ser classificados em orgânicos ou inorgânicos, sendo que, os últimos podem ainda ser subdivididos em naturais ou artificiais. Devido à menor importância dos agregados orgânicos para o presente documento, estes não serão abordados.

Os agregados naturais recebem esta denominação devido à sua proveniência, isto é, resultam de matérias-primas que apenas são submetidas a processos de britagem e separação (EuroLightCon, 1998). Nesta categoria, assumem maior destaque a pedra-pomes, a escória, os tufo e os diatomitos. Como se pode constatar, a vasta maioria dos agregados naturais são de origem vulcânica pelo que a sua utilização se encontra limitada, uma vez que só se encontram disponíveis em algumas regiões.

Os agregados artificiais classificam-se em função da proveniência da matéria-prima utilizada. Por norma, recorre-se a três processos de fabrico: processamento térmico; técnicas de arrefecimento; tratamento de subprodutos industriais. O processamento térmico tem como objectivo originar a expansão de matérias-primas como argila, xisto ou ardósia. O aumento de volume associado deve-se,

sobretudo, ao aprisionamento de gases na massa piroclástica, sendo que os produtos resultantes apresentam normalmente baridades entre 300 e 900 Kg/m³ (Neville e Brooks, 2013). A finalidade das técnicas de arrefecimento consiste na manutenção da estrutura porosa da matéria fundida, semelhante à da pedra-pomes, produzindo, por exemplo, escória de alto forno expandida ou escória espumosa cujos pesos específicos variam entre os cerca de 650 e 900 Kg/m³.

A Figura 2.2 resume de forma esquemática os diversos tipos de agregados leves.

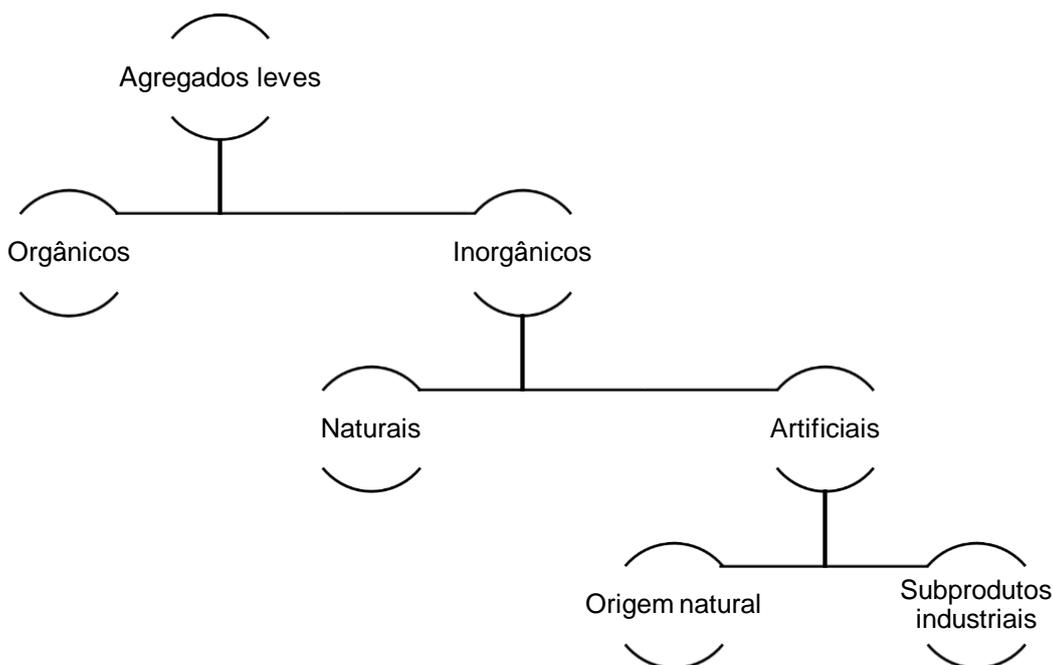


Figura 2.2 - Resumo esquemático dos diversos tipos de agregados leves

Contudo, nem todos os tipos de agregados leves possuem características que permitam o fabrico de betões estruturais. Esta afirmação encontra-se patente no Quadro 2.1, uma vez que nem todos os betões leves cumprem a especificação do Eurocódigo 2, que refere que betões com classes inferiores a LC 12/15 não devem ser utilizados para fins estruturais.

Quadro 2.1 - Propriedades de betões leves em função do agregado, (Adaptado de Neville e Brooks, 2013)

Tipo de betão	Massa volúmica do agregado leve (kg/m ³)	Massa volúmica do betão seco (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)
Celular	1600	900	6
Celular autoclavado	-	800	4
Escória expandida	900	1850	21
Argila expandida de forno rotativo	700	1100	14
Argila expandida de esteira	1050	1500	24
Ardósia expandida de forno rotativo	950	1700	28
Cinza volante sinterizada	1050	1500	25
Cinza volante sinterizada areia natural	800	1700	25
Pedra-pomes	500-800	1250	19
Vermiculita	65-130	300-500	2
Perlite	95-130	-	-

Os agregados devem possuir propriedades mínimas de resistência pelo que a produção de BEAL faz-se, usualmente, com recurso a agregados expandidos (argila, xisto e ardósia), agregados de escórias e cinzas volante e agregados naturais de origem vulcânica (Cortês, 2014).

O recurso a betões leves estruturais acarreta várias consequências, que consoante a sua utilização podem ter implicações positivas ou negativas. A principal vantagem consiste na redução entre 20 a 40 % da massa volúmica relativamente aos BAN. O maior custo inicial poderá ser compensado pela redução de encargos com a construção e exploração das edificações (Bogas, 2011). Devido à natureza porosa dos agregados leves e à sua maior absorção, exigem-se maiores cuidados no controlo de trabalhabilidade dos BEAL no estado fresco. A compensação de água da mistura e o controlo da segregação são algumas das dificuldades normalmente apontadas a estes betões (Holm e Bremner 2000, Newman 1993, FIP 1983).

A baixa condutividade térmica dos betões leves, devido à sua maior porosidade interna, dota os mesmos de uma melhor capacidade de isolamento térmico. Porém, pode induzir fissuração inicial causadas pelo aumento da temperatura de cura de grandes volumes de betão (Neville e Brooks, 2013).

É referido que os betões armados leves podem ser mais susceptíveis à despassivação da camada protectora das armaduras devido a fenómenos de corrosão induzida por carbonatação (Gao Yingli et al. 2013, Holm e Bremner 2000). Este assunto será abordado nas seguintes secções deste capítulo.

2.3 Durabilidade

A durabilidade de um betão define-se pela sua capacidade de providenciar uma resposta adequada para as solicitações a que está sujeito (Neville 1995). Como tal, é evidente que a durabilidade associada a um betão não é apenas função das propriedades dos materiais, dependendo também das condições ambientais a que se encontra exposto. Portanto, e de acordo com a agressividade do ambiente, um determinado betão poderá apresentar uma elevada durabilidade ou apresentar um elevado nível de degradação (Bogas 2011).

Existe uma profunda relação entre o conceito previamente enunciado e a noção de vida útil. A relação entre durabilidade e vida útil é auxiliada por indicadores do nível de desempenho, como por exemplo a profundidade de carbonatação ou a profundidade de penetração de fluidos. Assim sendo, a vida útil de uma estrutura corresponderá ao espaço temporal no qual se verificam os níveis de desempenho devidamente considerados (Bogas 2011, Cortês 2014, Kropp 1995).

Torna-se então crucial compreender que factores poderão conduzir à deterioração de um betão. Primeiramente, refira-se que a sua degradação está condicionada pelo desempenho de cada um dos seus constituintes (pasta, agregado ou armadura), pelo que é crucial garantir *a priori* a adequabilidade de todos os componentes ao ambiente de exposição e função a desempenhar.

As acções que induzem deterioração no betão podem ser classificadas de acordo com a natureza do fenómeno que as origina. Deste modo, torna-se lógico agrupar estas mesmas acções em função da sua origem, facilitando assim a compreensão dos processos associados à durabilidade de um betão. Em seguida, apresenta-se o resultado desta categorização.

- **Acções físicas** – variações de temperatura e humidade, acção gelo-degelo, deposições atmosféricas e cristalização de sais, elevadas temperaturas, fogo, sais descongelantes, retracção plástica;
- **Acções mecânicas** – abrasão, impacto, explosão, erosão ou cavitação;
- **Acções químicas** – eflorescências e lixiviação, ataque de sulfatos, iões magnésio e amónio, hidrólise da pasta de cimento por acção de águas puras ou moles, reacções álcalis-agregado, ataque de ácidos, corrosão de armaduras;
- **Acções biológicas**
- **Acções estruturais**

Os níveis de desempenho de um betão armado dependerão, obviamente, da durabilidade associada aos seus constituintes; o betão e a armadura. Contudo, os dois processos de deterioração estão intimamente relacionados, pelo que deverão ser analisados conjuntamente, uma vez que a degradação do betão conduzirá à redução do recobrimento, expondo assim as armaduras e provocando a corrosão das mesmas. Por sua vez, a corrosão associada causará fendilhação, originando assim destacamentos que colocam em causa o comportamento estrutural do betão devido à redução da aderência da armadura (Bogas 2011).

Refira-se ainda, que de acordo com Mehta e Monteiro (2006), a corrosão da armadura, a acção gelo-degelo, reacção álcalis-silica e ataque de sulfatos, constituem, por ordem de importância, as principais acções que conduzem à deterioração do betão.

Este trabalho incidirá, apenas, no estudo da profundidade de carbonatação e à consequente corrosão das armaduras. Numa etapa inicial procede-se à definição do mecanismo de carbonatação e à previsão da evolução deste fenómeno. Seguidamente, caracterizam-se as variáveis que influenciam a taxa de carbonatação e analisam-se as implicações das propriedades dos BEAL, e de que forma estas poderão influenciar o processo de carbonatação. Por fim, aborda-se a corrosão induzida por carbonatação.

2.3.1 Carbonatação

As reacções de hidratação do cimento produzem componentes alcalinos que, por sua vez, irão reagir quimicamente com o CO₂ presente na atmosfera, conduzindo assim a uma redução do pH da solução aquosa contida nos poros do betão. Este fenómeno denomina-se por carbonatação. Em casos correntes, os ambientes de exposição a que os betões se encontram sujeitos possuem níveis de concentração de CO₂ bastante baixos, por exemplo, em zonas residenciais, podendo, no entanto, atingir valores significativamente mais altos em zonas industriais e túneis rodoviários. Por conseguinte,

em geral, o processo de carbonatação será lento. Contudo, este mecanismo não deverá ser desconsiderado aquando da determinação do recobrimento a adoptar, visando assim salvaguardar a película passiva que protege as armaduras que apenas é estável em meios de elevada alcalinidade (Bertolini 2004).

2.3.1.1 Mecanismo de carbonatação

A formação de carbonatos exige, obviamente, a presença de CO₂ e a existência de um teor mínimo de água nos poros do betão. A necessidade de humidade explica-se pelas características reactivas do ácido carbónico, que não se verificam no CO₂ *per si*. É amplamente reconhecido que a carbonatação não se limita, exclusivamente, ao consumo de hidróxido de cálcio, e que envolve a participação de outros compostos contidos na pasta de cimento (Basheer et al. 2001). A diminuição do pH na solução dos poros, de valores na ordem de 12,5 a 14, em função do tipo de cimento, para grandezas inferiores a 9, é apontada por diversos autores como a principal consequência da carbonatação ocorrida em betões (Bakker 1998, Bertolini et al. 2004 e Bogas 2011)

Resumidamente, pode-se dizer que o mecanismo de carbonatação envolve três etapas inteiramente distintas devido à origem dos componentes reactivos. Nos poros encontra-se uma solução que contém, principalmente, três tipos de hidróxidos: hidróxido de sódio, NaOH, hidróxido de potássio, KOH, e hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂ (Bertolini, et al. 2004). Numa primeira fase, ocorre a carbonatação relativamente rápida de NaOH e KOH, ou seja o CO₂ interage com estes compostos alcalinos para então reagir com o hidróxido de cálcio (Salta 1996). Seguidamente, verifica-se a carbonatação dos Ca(OH)₂ que, de acordo com Tiery et al. (2005), compreende cinco fases principais: a dissolução do CO₂ (2.1), a dissolução do ácido carbónico e o consumo de iões OH⁻ ((2.2),(2.3)), a dissolução de Ca(OH)₂ (2.4), a formação de carbonatos (2.5) e, por fim, a libertação de água (2.6). Abaixo, apresenta-se, respectivamente, as equações correspondentes às reacções químicas previamente enunciadas.



A presença dos compostos hidratados do cimento, como aluminossilicatos e silicatos de cálcio hidratados, irá também desencadear processos de carbonatação. Contudo, estas reacções ocorrem, segundo Salta (1996), a longo prazo formando um gel amorfo de sílica com estrutura porosa (Kropp 1995a). É importante realçar que a carbonatação dos C-S-H não terá influência nos níveis de pH da solução presente nos poros, dado que a dissolução destes compostos é bastante mais lenta relativamente à dos $\text{Ca}(\text{OH})_2$. De acordo com Bogas (2011), os C-S-H contribuem para o atraso da difusão do CO_2 em virtude da sua grande capacidade de fixação de moléculas do referido dióxido.

2.3.1.2 Previsão da carbonatação

O mecanismo de carbonatação envolve, como foi anteriormente descrito, diversas etapas e variadas componentes que lhe conferem uma complexidade química que, à primeira vista, poderia parecer relativamente básica. Existem ainda, outras condicionantes de natureza prática que incrementam a complexidade do estudo e a compreensão global do processo, tais como a lentidão do fenómeno que dificulta em sobremaneira o estudo em ambientes de exposição real e a dificuldade em efectuar uma correspondência adequada dos resultados obtidos em ensaios acelerados com a realidade. Adicionalmente, há que considerar a influência que algumas variáveis exercem sobre o modo de carbonatação, entre elas encontram-se, as condições ambientais e factores intrínsecos relacionados com a composição do betão. Em §2.3.1.2.2 encontra-se uma análise mais detalhada sobre o papel que as ditas variáveis desempenham no mecanismo de carbonatação.

De acordo com Bogas (2011), a velocidade com que o dióxido de carbono e os iões carbonato se movimentam no interior do betão e, conseqüentemente reagem com a pasta de cimento afectam a taxa de carbonatação. Este autor refere ainda que esta ocorrência é recorrentemente caracterizada pelo uso simplificado da primeira lei de Fick, que se baseia no estabelecimento de um gradiente entre a concentração de CO_2 no ambiente e na frente de carbonatação (ver §2.3.1.3).

É importante tecer algumas considerações relativas ao mecanismo de carbonatação. Como refere Lagerblad (2005), existe um fluxo de iões Ca^{2+} com sentido inverso à difusão de CO_2 e de iões carbonatos para o interior do betão. Deste modo, os componentes de CaCO_3 presentes nos poros do betão irão depositar-se no sítio onde se verificarem menores concentrações de iões CO_3^{2-} e Ca^{2+} , influenciando assim a velocidade de difusão de CO_2 devido à alteração da porosidade da camada carbonatada. Esta situação encontra-se esquematicamente ilustrada na Figura 2.3.

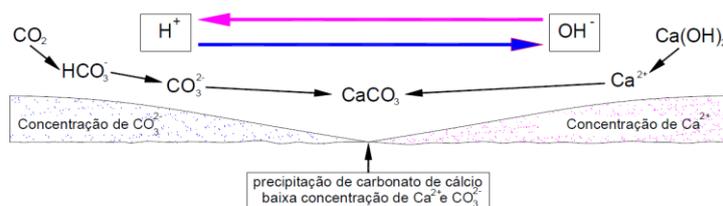


Figura 2.3 – Esquematização do processo de difusão de dióxido de carbono num betão (Bogas, 2011)

Devido aos períodos de estudo normalmente exigidos no meio científico, a análise da resistência à carbonatação em betões sustenta-se em ensaios acelerados onde os espécimes são expostos a elevadas concentrações de CO₂ e a secagens bruscas (50 a 70% HR). Posteriormente, procede-se à aplicação de uma solução alcoólica de fenolftaleína sobre provetes devidamente preparados para o efeito. Finalmente, é efectuada uma análise da superfície aspergida, considerando-se as áreas não afectadas pelo indicador como carbonatadas – estas zonas apresentam um pH inferior a 9,0 (Bertolini et al. 2004) – determinando-se assim a frente de carbonatação. Porém, o resultado obtido não permite aferir com rigor a preservação da película passiva que protege as armaduras. Vários autores, entre os quais Broomfield (1997) e Kashino (1984), referem que a despassivação poderá já ter ocorrido, respectivamente, a 5 mm ou a 6 a 8 mm da frente de carbonatação.

2.3.1.2.1 Modelação do mecanismo de carbonatação

Para obter uma modelação matemática capaz de descrever o fenómeno em estudo, há que, à partida, definir que variáveis deverão ser consideradas e qual o grau de precisão pretendido. Como se refere anteriormente, existem muitas vertentes relevantes no mecanismo de carbonatação. Resumidamente, pode-se dizer que existem dois tipos de abordagens na previsão da frente de carbonatação. Por um lado, diversos autores, entre os quais Kropp (1995a), recorrem a algumas aproximações que produzem uma estimativa válida para ensaios laboratoriais sendo, no entanto, desajustadas à exposição real. Por outro, existem modelos que incorporam o uso de outras vertentes não incluídas na abordagem previamente descrita, tais como a humidade relativa no betão e as condições da cura. Porém, a quantificação destas componentes apresenta-se frequentemente como um entrave, uma vez que, em muitos casos, não são constantes na espessura do betão. Sobre este aspecto, Bakker (1988) mostra-se céptico relativamente à possibilidade de se definir um modelo de previsão que comporte todos os parâmetros envolvidos na carbonatação com a precisão adequada. Dito isto, neste trabalho a modelação do mecanismo de carbonatação basear-se-á em dois aspectos chave, a difusão de CO₂ como principal mecanismo de transporte – devida ao gradiente de concentração de CO₂ – e a quantidade de CO₂ necessária para reagir com os compostos alcalinos presentes na pasta cimentícia.

Segundo Bogas (2011), e de acordo a primeira lei de Fick, a massa de CO₂ transportada por difusão através do betão é dada pela equação (2.7).

$$m = -D_{CO_2} \cdot A \cdot \frac{c_{e,CO_2} - c_{i,CO_2}}{x_c} \cdot t \quad (2.7)$$

Onde:

m - massa de CO₂, (g);

D_{CO_2} – coeficiente de difusão de CO₂ através do betão carbonatado, (m²/s);

A – área atravessada pelo fluxo de CO_2 , (m^2);

c_{e,CO_2} – concentração de CO_2 no exterior, (g/m^3);

c_{i,CO_2} – concentração de CO_2 na frente de carbonatação, (g/m^3);

t – tempo, (s);

x_c – profundidade de penetração de CO_2 , (m);

Nota: A concentração de CO_2 na frente de carbonatação considera-se como nula, uma vez que se admite que nessa região o CO_2 é totalmente consumido.

Assim sendo, é necessário que na frente de carbonatação se encontre disponível uma dada quantidade de CO_2 , a_c , capaz de reagir com os constituintes alcalinos da matriz porosa do betão, incrementando em dx a espessura da frente carbonatada (Kropp 1995a).

$$m = a_c \cdot A \cdot dx \quad (2.8)$$

A análise intuitiva do processo de carbonatação requer a utilização de um indicador que permita averiguar expeditamente a progressão da carbonatação num dado betão. Para o efeito, adopta-se um factor denominado por coeficiente de carbonatação, K_c . Em termos práticos, este coeficiente quantifica a evolução da frente de carbonatação em ($\text{mm}/\text{ano}^{1/2}$) e provém da integração em ordem a x_c da expressão resultante da igualdade das equações (2.7) e (2.8).

$$a_c \cdot A \cdot dx = -D_{\text{CO}_2} \cdot A \cdot \frac{c_{e,\text{CO}_2} - c_{i,\text{CO}_2}}{x_c} \cdot t \quad (2.9)$$

$$x_c = \sqrt{2 \cdot D_{\text{CO}_2} \cdot \frac{c_{e,\text{CO}_2} - c_{i,\text{CO}_2}}{a_c} \cdot t} \quad (2.10)$$

$$x_c = K_c \cdot \sqrt{t} \quad (2.11)$$

$$K_c = \frac{x_c}{\sqrt{t}} \quad (2.12)$$

Para efeitos comparativos entre exemplares distintos, é pertinente adoptar um parâmetro que descreva a oposição oferecida pelos betões à carbonatação. No documento CEB238 (1997), a resistência à carbonatação, R_c , define-se como o quociente entre o coeficiente de difusão, D_{CO_2} , e a disponibilidade de matéria carbonatável, a_c .

A capacidade de materializar as equações acima descritas deriva da assunção de várias simplificações, tais como, a constância do coeficiente de difusão de CO₂ ou a consideração de uma fronteira bem definida entre a matéria carbonatada e não carbonatada (Bogas 2011). Ho e Lewis (1987) referem que a formação gradual de carbonatos resulta no surgimento de uma zona de transição e não na definição de uma fronteira abrupta. O coeficiente de difusão de CO₂ não é, na verdade, constante, uma vez que é severamente afectado por qualquer modificação passível de produzir alterações na estrutura porosa da matriz cimentícia, como a variação do teor em água, da temperatura ou das condições de cura registadas. Deduz-se então, que o coeficiente de difusão não é uniforme quer temporalmente, quer espacialmente (Lagerblad 2005), (Kropp 1995a). De acordo com Bogas (2011), a estimativa da quantidade de CO₂ requerida para reagir com os compostos alcalinos também não é simples, porque é função do tipo de cimento (nomeadamente do seu teor em CaO), da composição do betão e dosagem de adições.

À primeira vista, poderá parecer que a aplicação directa da primeira lei de Fick se encontra limitada devido às simplificações em que se baseia. No entanto, Wierig (1984) afirma que este modelo proporciona uma aproximação razoável aos registos que obteve em observações de longa duração em zonas protegidas da chuva. O expoente associado à componente temporal ajusta-se às condições verificadas em ensaios acelerados realizados em laboratório (Ho e Lewis 1987), porém tal não se verifica em espécimes sujeitos a ciclos de molhagem e secagem.

Com o intuito de considerar e colmatar as limitações referidas, surgiram várias propostas de modelação do mecanismo de carbonatação. Por exemplo, Thiery et al. (2005) consideram, no seu modelo numérico, a redução do coeficiente de difusão do CO₂ devido à obstrução originada pela libertação de água e diminuição da porosidade durante a formação de carbonatos. Conforme Bogas (2011), o método CTH, contido no CEB238 (1997), admite a variação do teor em água à medida que se progride na profundidade da zona carbonatada. Nessa referência, pode-se, ainda, encontrar um método de previsão bastante similar ao descrito na equação (2.10), mas que contempla a presença de humidade relativa no betão e as condições de cura representadas em (2.13) por, respectivamente, k_1 e k_2 . Este modelo aborda ainda os ciclos de molhagem e secagem através do factor n_c , admitindo um período de referência (1 ano), t_0 .

$$x_c = \sqrt{2 \cdot D_{CO_2} \cdot \frac{c_{e,CO_2} - c_{i,CO_2}}{a_{CO_2}} \cdot t \cdot \sqrt{k_1 \cdot k_2}} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{n_c} \quad (2.13)$$

2.3.1.2.2 Variáveis que influenciam a taxa de carbonatação

Existem inúmeros factores que desempenham um papel importante sobre o modo como se processa a carbonatação num dado betão. A força motriz deste processo é, como referido em §2.3.1.2.1, o gradiente estabelecido de CO₂ e a sua velocidade de transporte, pelo que quaisquer condicionantes que influenciem este mecanismo de transporte deverão ser devidamente consideradas. Sobre este aspecto, Bogas (2011) subdivide estas variáveis em dois grupos, condições ambientais

(humidade, temperatura e concentração de CO_2) e factores intrínsecos do betão relacionados com a sua composição (capacidade de fixação de CO_2 e permeabilidade). Mais concretamente, a taxa de carbonatação dependerá da concentração de CO_2 no ambiente de exposição e da capacidade que o próprio betão terá para o fixar, sendo que a progressão e evolução deste mecanismo serão afectadas por todos os fenómenos susceptíveis de alterar o modo de transporte do CO_2 no interior do betão, ou seja, por fenómenos capazes de induzir variações no preenchimento da microestrutura porosa do betão.

2.3.1.2.2.1 Condições ambientais

As condições ambientais assumem um papel preponderante na evolução da carbonatação. Destacam-se, segundo Smolczyk (1976), a humidade, a concentração de CO_2 e a temperatura. É necessário um teor mínimo de humidade para que se desenvolvam reacções de carbonatação, contudo quando se atinge a saturação dos poros a velocidade de transporte de CO_2 diminui abruptamente para valores cuja ordem de grandeza é quatro vezes inferior à registada no ar (Bertolini, et al. 2004). Denota-se então a existência de uma relação entre a humidade relativa e a taxa de carbonatação. Para condições de equilíbrio, Tuutti (1982) obteve um gráfico que correlaciona a taxa de carbonatação e a humidade relativa como demonstra a Figura 2.4. Da interpretação do mesmo, conclui-se que a taxa de carbonatação atinge valores máximos para humidades relativas situadas entre os 60 e 80%. Esta conclusão é corroborada por vários autores, entre os quais Bertolini et al. 2004, Neville (1995) e Lagerblad (2005), que sugerem um intervalo situado entre os 50 e 80%. Os ciclos de molhagem e secagem também desempenham um papel activo na taxa de carbonatação, visto que a ocorrência de sucessivos ciclos de molhagem conduzirá à diminuição da carbonatação (Bogas 2011). Relativamente à temperatura, Liand et al (2000) constataram que, face à manutenção de todas as variáveis, um aumento da mesma resultará num incremento das taxas de difusão e de carbonatação. Assim sendo, conclui-se que a precipitação, a orientação dos elementos de betão face ao vento incidente e a exposição solar assumem-se como factores relevantes.

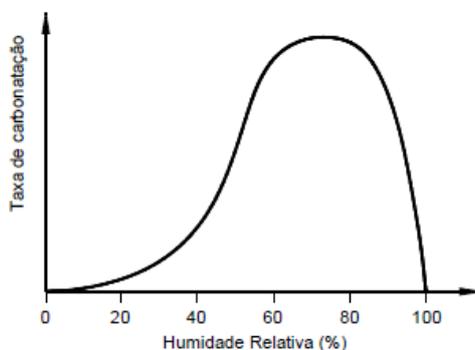


Figura 2.4 – Taxa de carbonatação em função da humidade relativa, (Tuutti, 1982)

2.3.1.2.2 Capacidade de fixação de CO₂

Existem diversos compostos presentes na estrutura porosa de um betão que têm capacidade para reagir com CO₂, ou seja substâncias carbonatáveis. Entre estes encontram-se o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH) (Schröderm; Smolczyk, 1969), sendo que o composto C-S-H também é susceptível de ser carbonatado.

Estes compostos assumem especial importância, uma vez que ao reagirem com o fluxo de difusão de CO₂ agem como agentes fixadores de CO₂ retardando a sua progressão para zonas interiores mais próximas da armadura.

Em suma, a composição química dos componentes utilizados constitui-se como um factor relevante que deverá ser levado em conta aquando da consideração de mecanismos de degradação associados a fluxos de difusão de CO₂.

2.3.1.2.3 Qualidade do betão

Quando se pretende avaliar qualitativamente um determinado tipo de betão, há que definir qual o propósito e função para que este foi concebido. Naturalmente, há que considerar várias especificações técnicas, mas devido ao âmbito deste documento a análise qualitativa cingir-se-á à resistência oferecida à evolução da frente de carbonatação. Este fenómeno não será apenas função da formulação e composição do betão, mas também da qualidade de execução do mesmo. Procura-se estabelecer uma relação causa-efeito entre estas condicionantes e a taxa de carbonatação, determinando em que medida estas poderão induzir alterações na permeabilidade do betão

É fundamental que o processo de aplicação do betão seja devidamente executado, pois poderão ocorrer mecanismos de segregação e exsudação que afectarão a porosidade superficial do betão. Deve-se, também, procurar minimizar todos os efeitos de parede decorrentes do processo de moldagem, evitando assim a formação de heterogeneidades na interface betão/ambiente de exposição. A cura exerce, também, um papel activo na taxa de carbonatação. O aumento do grau de hidratação, devido a curas mais efectivas, conduz à redução da porosidade capilar e incremento da percentagem de substâncias carbonatáveis, resultando assim na diminuição da taxa de carbonatação (Bogas 2011). Refira-se ainda, que, de acordo com Ho e Lewis (1987), este efeito assume especial importância nos primeiros sete dias de cura.

Relativamente às questões relacionadas com a formulação, estas resumem-se em três aspectos fundamentais: relação *a/c*, tipo de cimento e a incorporação de adições. A relação *a/c* fornece um indicador do grau de permeabilidade de um betão, sendo que ao decréscimo desta propriedade está associada uma redução da taxa de carbonatação (Bertolini, et al. 2004; Lagerblad 2005). As propriedades do cimento utilizado têm influência na progressão do processo de carbonatação. Por exemplo, a utilização de fíler calcário origina maiores profundidades de penetração devido à redução da capacidade de fixação de CO₂ decorrente da diminuição da quantidade de clínquer (Bogas 2011).

Contudo, a alteração da quantidade de cimento, desde que se mantenha a relação a/c, não deverá introduzir alterações significativas na taxa de carbonatação (Lagerblad 2005).

2.3.1.2.2.4 Betões com adições

A influência devida à utilização de adições sobre a taxa de carbonatação manifesta-se, essencialmente, em duas vertentes, a quantidade de material carbonatável e o refinamento da matriz cimentícia. Neste documento, pretende-se abordar os efeitos produzidos pela utilização de adições pozolânicas, mais concretamente, cinzas e sílica de fumo. A incorporação de adições pode ser levada a cabo de dois modos distintos, pode-se proceder à substituição parcial de uma dada quantidade de cimento ou pode-se, simplesmente, adicionar estes materiais ao cimento. No primeiro caso, procura-se aferir se a redução da capacidade de fixação de CO_2 derivada do consumo adicional de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ das reacções pozolânicas poderá ser compensada pelo potencial refinamento da microestrutura. Aquando da incorporação de cinzas, diversos resultados apontam para um aumento da profundidade de carbonatação. No caso de betões com sílica de fumo não existe uma opinião consensual, devido à existência de investigações com resultados contrastantes (Bogas 2011).

A adição de substâncias pozolânicas, sem recurso à substituição parcial de cimento, resulta no aumento da resistência à carbonatação de um dado betão, uma vez que, à partida, melhorará dois aspectos importantes acima referidos. O aumento de desempenho deve-se sobretudo à formação de produtos de hidratação que conduzem ao refinamento da microestrutura.

2.3.1.2.3 Corrosão induzida por carbonatação

A viabilidade da introdução de aço em betão deve-se, sobretudo, à formação de uma película passiva capaz de proteger o aço da formação e proliferação de fenómenos de corrosão. Este mecanismo protector deriva da elevada alcalinidade da solução aquosa presente na matriz porosa, que se deve, maioritariamente, à presença de hidróxidos de sódio (NaOH) e de potássio (KOH) (Longuet et al, 1973). O processo de corrosão desenvolve-se, de acordo com Bakker (1998), pela penetração de agentes agressivos que actuam sobre dois mecanismos, a carbonatação e o ataque localizado de cloretos, sendo que as taxas de corrosão associadas à carbonatação são menos significativas do que as registadas no ataque de cloretos (Bogas 2011).

A ocorrência de mecanismos de carbonatação tem como principal consequência a redução dos níveis de pH, colocando em risco a protecção alcalina anteriormente oferecida pelo meio envolvente às armaduras. A análise do grau de exposição do aço a fenómenos de corrosão baseia-se no modelo proposto por Tuutti (1982), onde se definem três fases distintas: iniciação, despassivação e propagação. Considera-se simplifadamente como sendo nulo o grau de corrosão correspondente às primeiras duas fases, adoptando-se em seguida uma tendência linear para o avanço do processo. Como tal, admite-se que a corrosão induzida por carbonatação é efectiva quando a frente de carbonatação atinge a superfície das armaduras (Tuutti 1982).

A taxa de corrosão é função de diversos factores e condicionantes, como a concentração do agente agressivo (CO_2), as características da matriz cimentícia e, sobretudo, as condições de interacção entre o meio ambiente e a estrutura de betão.

O principal agente a considerar nas condições ambientais é a presença de humidade e a compreensão das implicações ocorridas devido à variação da mesma, não apenas no processo corrosivo, mas também sobre os mecanismos de carbonatação. O teor em água no betão influencia fortemente a taxa de corrosão, constatando-se que os valores máximos de corrosão estabelecem-se para humidades relativas muito elevadas, ao passo que para condições ditas normais, os valores tendem a ser significativamente inferiores. Esta relação encontra-se ilustrada na Figura 2.5, que sumariza os resultados obtidos por Page (1992).

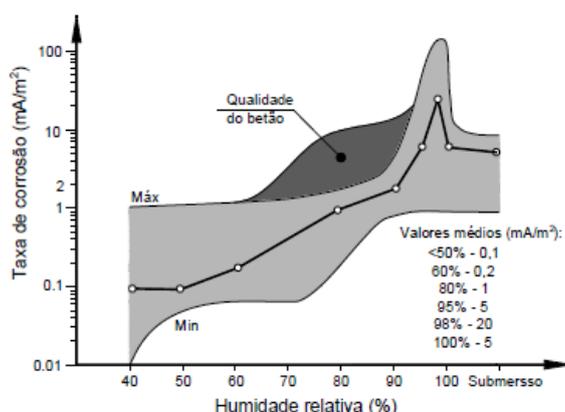


Figura 2.5 – Taxa de corrosão em função da humidade relativa (Page,1992)

Verifica-se, então, e com base no exposto na §2.3.1.2.2.1, que os valores máximos efectivos para a taxa de carbonatação e de corrosão encontram-se desfasados em função da humidade relativa. No primeiro caso, as taxas máximas obtêm-se no intervalo compreendido entre 50 e 80% de humidade relativa, ao invés do que se verifica para a taxa de corrosão, onde se obtém uma gama situada entre os 90 e 100%. Este cenário pressupõe que a corrosão do aço será mais gravosa em situações onde se verifiquem oscilações nos valores da humidade relativa ao nível da superfície das armaduras, potenciando a efectivação plenas dos fenómenos anteriormente descritos, ou seja em longos ciclos de molhagem e secagem (Bertolini et al, 2004).

2.4 Durabilidade nos BEAL

É expectável que os atributos que caracterizam os agregados leves produzam um espectro de resposta distinto ao registado pelos agregados de massa volúmica normal quando submetidos às solicitações impostas pelo meio envolvente, pelo que quando se aborda questões relativas à durabilidade dos BEAL, como aquela a que se cinge o âmbito deste documento, é uma boa prática isolar as condicionantes que possam exercer diferenças significativas no comportamento dos betões, simplificando assim a compreensão e explicação dos fenómenos em estudo. A maior parte deste levantamento já foi efectuada nas secções anteriores, onde, resumidamente, se concluiu que a

porosidade e massa volúmica são as principais características que distinguem os dois tipos de betão, pelo que o ponto de partida desta análise deverá incidir sobre estas temáticas. Relativamente ao mecanismo de carbonatação, aferiu-se que a qualidade do betão e a permeabilidade ao gás são os aspectos mais relevantes (devido à sua relação com o coeficiente de difusão de CO₂).

À partida, surge a problemática derivada da maior porosidade dos agregados leves comparativamente à matriz cimentícia que, eventualmente, pode levar à constituição de zonas de passagem preferenciais através do agregado, uma vez que a maior porosidade registada nos agregados constitui um factor que tende a reduzir a sua resistência à carbonatação, visto que estes apresentam uma fraca resistência à difusão de CO₂, aumentando assim o seu grau de participação na difusão de gases (Dhir et al 1989, CEB-FIP 1977). Por outro lado, os BEAL estão usualmente associados a menor relação a/c, resultando assim numa matriz cimentícia mais compacta. Porém, como refere Bogas (2011), os betões devem ser analisados como um todo e não como a soma de todas as partes. O mesmo autor elabora ainda algumas considerações bastante esclarecedoras sobre o nível de porosidade e o modo como a mesma se traduz numa maior/menor permeabilidade, como por exemplo, a análise da conectividade e da constituição da estrutura porosa para se poder aferir se a mesma consiste numa porosidade aberta ou fechada. Este fenómeno será de extrema importância, dado que um espécime poderá apresentar baixa porosidade e, no entanto, apresentar alta permeabilidade, o que se tornará prejudicial relativamente à difusão de CO₂.

Constata-se, portanto, que a permeabilidade é função de certas variáveis, tais como a porosidade e a conectividade entre os poros. Os agregados leves encontram-se usualmente rodeados por ligante, pelo que, à partida, a conectividade entre partículas de agregado é diminuída. Assim, a compacidade desta pasta é um forte factor de obstrução à penetração de substâncias (Liu et al. 2010). Deve-se ainda considerar o modo como se processam as zonas de transição entre o agregado e a pasta cimentícia. Estas zonas de interface são determinantes no modo como se processam as relações e caminhos de conectividade em espécimes de betão, influenciando assim de sobremaneira a permeabilidade dos mesmos. Neste caso, os betões que incorporam agregados leves, em função da melhor qualidade da pasta para betões de igual resistência e da maior qualidade das zonas de interface levam vantagem face aos BAN (Hammer e Hansen, 2000).

Devido ao acima exposto, depreende-se que permeabilidade dos betões leves não é necessariamente superior à dos BAN, conforme corroborado por Bogas (2011) que refere a existência de evidências que permitem afirmar que a permeabilidade não tem de ser superior nos BEAL. De acordo com o FIP (1983), devido à melhor compatibilidade elástica os betões que incorporam partículas de agregado leve apresentam menor ou igual nível de permeabilidade relativamente aos betões de agregados normais.

Como se refere em §2.3.1.2.2.1, o teor de humidade presente nos poros do betão é um conceito chave no comportamento que os betões apresentam quando sujeitos, no seu interior, ao transporte de CO₂. Deste modo, e em consonância com os elementos descritos anteriormente nesta secção, é relevante perceber o comportamento dos betões em análise relativamente à permeabilidade à água e,

sobretudo, ao gás. Várias fontes, entre as quais o ACI213R (2003), reportam menores índices de permeabilidade ao gás e à água nos BEAL. Relativamente à permeabilidade à água, o mesmo foi confirmado por Vaysburd (1996), bem como por Zhang e Gjørsv (1991). No entanto, nas investigações levadas a cabo por Nyame (1985) onde se comparam argamassas com relações a/c idênticas, constataram-se permeabilidades à água de cerca do dobro do verificado nos betões convencionais. Esta ocorrência deve-se, segundo Bogas (2011), à importância que cada uma das fases da mistura (agregado, pasta e interface) desempenha neste processo.

A permeabilidade e difusibilidade de gases regem-se pelo teor em água no betão. Os betões leves apresentam diferenças significativas nesta vertente, nomeadamente no que diz respeito ao tempo de secagem e às migrações de água que ocorrem no interior dos mesmos. Quando se recorre à utilização de agregados leves, existe um aumento do teor inicial em água (Smeplass, 2000), que numa fase mais adiantada do processo de cura fará com que estas partículas actuem como pequenos reservatórios abastecedores de humidade, fazendo com que os poros da matriz cimentícia se mantenham saturados, dificultando assim a difusibilidade de gases. Por este facto, obtêm-se maiores tempos de secagem, fazendo com que o equilíbrio de humidade no betão demore mais tempo a se efectivar (FIP 1983). Naturalmente, esta ocorrência será mais proeminente caso se verifiquem menores relações a/c.

O papel desempenhado pela porosidade dos agregados leves, de acordo com Lydon (1995), só é relevante quando a qualidade da pasta envolvente é inferior, sendo que, nestes casos, há ainda que esperar que o teor de humidade nos poros seja mais baixo, abrindo assim caminho à passagem dos gases. Mais objectivamente, é possível estabelecer uma relação entre este fenómeno e a relação a/c. Este facto é sustentado em resultados experimentais obtidos por Vieira em 2003. Este autor verificou que, para relações a/c na ordem dos 0,3, os valores referentes à permeabilidade são bastante semelhantes, sendo no entanto menores no betões leves. Ao incrementar a relação a/c para 0,45, Vieira (2003) observou que os betões convencionais apresentavam valores de permeabilidade bastante menores. Quando se consideram proporções entre água e ligante de, aproximadamente, 0,6 a permeabilidade aos gases nos BEAL assumem valores que podem atingir o dobro dos constatados em betões convencionais (CRIC, 1977).

Portanto, é perceptível que as propriedades em análise não dependem apenas das propriedades físicas do betão, mas também das condições a que se encontram expostos, quer sejam casos de exposição real ou ensaios controlados em laboratório.

2.4.1 Carbonação nos BEAL

Quando se procede à análise comparativa entre as profundidades de carbonatação obtidas nos BEAL e nos BAN, é crucial que se faça uma escolha adequada dos dados para que se possa perceber qual o papel desempenhado pelos agregados leves. Este estudo comporta dois pontos de vista distintos, a comparação entre betões de resistência similar ou a comparação de betões com composições idênticas. Na primeira situação, os agregados usufruem do efeito protector fornecido pela

pastas de maior qualidade, estando assim menos aptas para participar no processo. No segundo caso, quando se consideram misturas semelhantes para betões leves e betões convencionais, naturalmente, a compacidade de ambas as matrizes cimentícia será igual, pelo que é possível observar mais concretamente o papel desempenhado pelos agregados leves.

Os agregados leves, devido à sua maior porosidade, deverão apresentar menores resistências à difusão de gases, e por conseguinte a mecanismos de carbonatação (Dhir, Munday e Cheng, 1989; CEB-FIP, 1977; FIP, 1983; Newman, 1993). Como se referiu anteriormente, quando se recorre à utilização de agregados leves, o teor em água faz-se notar de duas formas. Inicialmente, obtém-se um maior teor inicial de água, bem como maiores tempos de secagem, retardando a participação da estrutura porosa dos agregados leves na difusão de gases. Esta libertação de água por parte dos agregados é claramente visível na Figura 2.6, que ilustra o trabalho desenvolvido por Maruyama et al (2009), no âmbito das trocas de água entre as partículas de agregado leve saturadas e a matriz cimentícia.

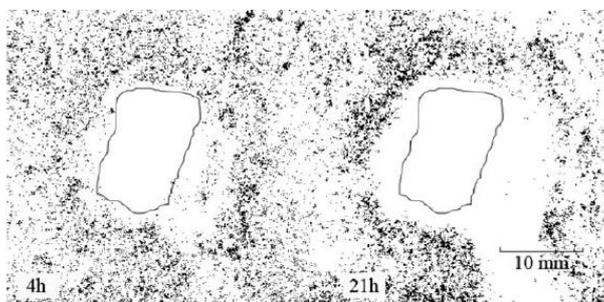


Figura 2.6 – Libertação de água pelos agregados leves saturados após 4 e 21 horas a mistura (Maruyama et al, 2009)

Porém, uma vez estabelecido o equilíbrio na humidade relativa do betão estes ficam acessíveis para contribuir no processo. Dado que, a longo prazo este equilíbrio tende a estabelecer-se, é fundamental garantir que as partículas de agregado tenham uma dispersão adequada na pasta cimentícia. Por outras palavras, deve-se procurar um espaçamento adequado entre as mesmas de modo a evitar a aglomeração de agregados que resultaria na formação de pontes de difusão, aumentando assim a velocidade de transporte de CO_2 , que, por fim poderia resultar num maior avanço da frente de carbonatação. Do mesmo modo, em alguns documentos recomenda-se a adopção de medidas prescritivas para que não se estabeleçam as referidas pontes de difusão entre o meio exterior e as armaduras, como por exemplo a consideração de uma espessura de recobrimento que seja, no mínimo, 5 mm superior a dimensão máxima do agregado.

De acordo com Chandra e Berntsson (2003), quando as partículas se encontram envolvidas em pasta de elevada qualidade, as profundidades de carbonatação registadas nos BEAL e nos BAN são da mesma ordem de grandeza. Sobre este aspecto, Swamy e Jiang (1992) constataram que os betões mais vulneráveis a mecanismos de carbonatação serão aqueles que apresentem maiores níveis de porosidade global para uma dada relação a/c. A porosidade dos agregados leves é, também, parte activa deste processo como constatou Vieira (2003) ao verificar maiores profundidades de carbonatação em BEAL do que em BAN de igual composição. Este comportamento poderá ser

explicado pelas conclusões de Shulze e Gunzler (1968) que colocaram a hipótese de se estabelecer uma maior difusão de CO₂ nas partículas de agregado em função da sua porosidade.

Gündüz e Ugur (2005), após o estudo de betões leves produzidos com pedra-pomes, aferiram uma redução na frente de carbonatação à medida que se diminuiu o rácio entre o volume de agregado e de cimento. Paralelamente, vários autores, como Roy et al. (1996) e Atis (2003), identificaram uma relação de proporcionalidade inversa entre a resistência à carbonatação e a resistência à compressão. Esta conclusão é corroborada por Bilodeau et al. (1995) que atribuíram os baixos níveis de carbonatação registados em betões leves de elevada resistência às baixas relações a/c. Refira-se, também, que a esta situação está associada uma maior disponibilidade de material carbonatável, o que, obviamente, aumenta a resistência à profundidade de carbonatação devido ao incremento da capacidade de fixação de CO₂ (Vaysburd 1996).

No entanto, Rodhe e X-Betong (1986) verificaram um melhor desempenho quando procederam à substituição de agregado normal por agregados leves de argila sinterizada, não obstante de o betão leve apresentar menor resistência à compressão. Os autores explicam este fenómeno pela adição de polímeros e pelas reacções pozolánicas adicionais entre o cimento e o agregado.

O trabalho experimental executado por Bremner et al. (1994) permitiu concluir que para BEAL e BAN da mesma gama de resistência, os betões leves apresentaram maior resistência à profundidade de carbonatação quer em ambientes de exposição real, quer em ensaios acelerados. Por sua vez, Haque et al. (2004), obtiveram comportamentos semelhantes para os dois tipos de betão.

A incorporação de adições irá também afectar o comportamento do betão. Gao et al. (2013) verificaram uma degradação do comportamento de betões leves devido às adições de cinzas volantes e escórias de alto forno, relativamente a betões de referência sem adições. Sobre este facto, Lo et al. (2008) não registaram aumentos significativos nas profundidades de carbonatação em BAN e BEAL após a substituição de 25% de cimento por cinza volante. Por fim, os mesmos autores enfatizam a influência que a temperatura durante o processo de cura exerce sobre a carbonatação. Na vasta maioria dos casos, os espécimes cuja cura foi executada a quente, apresentaram maiores profundidades de carbonatação.

3 Campanha Experimental

3.1 Introdução

Este capítulo tem objectivo apresentar a campanha experimental realizada no Laboratório de Construção – Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura – do Instituto Superior Técnico, que foi definida com o intuito de analisar a resistência à carbonatação de betões leves produzidos com diferentes tipos de agregados. Serão apresentados todos os materiais e constituintes utilizados ao longo do trabalho, bem como os ensaios de caracterização realizados com referência às normas e documentos técnicos necessários para a definição dos objectos de estudo.

Esta campanha experimental e todos os resultados obtidos foram fruto de um enorme espírito de equipa e de muito trabalho colaborativo por parte de todos os elementos da equipa de trabalho. Sem a sua ajuda não me teria sido possível realizar um trabalho desta magnitude.

3.2 Descrição da campanha experimental

Após uma primeira fase de selecção e caracterização dos materiais, procedeu-se à formulação dos betões a utilizar no presente estudo. A composição das misturas foi definida tendo em consideração a experiência adquirida em trabalhos anteriores, visto que o presente trabalho faz parte integrante de um projecto de investigação iniciado em 2013 e que visa exactamente analisar a durabilidade de betões estruturais produzidos com agregados leves.

Para a caracterização dos agregados foram realizados os ensaios referidos em seguida:

- Análise granulométrica – NP EN 933-1 / NP EN 12620;
- Massa volúmica e absorção de água – NP EN 1097-6;
- Baridade – NP EN 1097-3;
- Índice de forma – NP EN 933-4 / NP EN 12620.

Na produção dos betões foi ainda utilizado o cimento tipo I 42,5R, gentilmente fornecido pela empresa SECIL, cinzas volantes provenientes da central eléctrica de Sines e sílica de fumo, cedida pela empresa BASF. As principais caracterizações destes materiais apresentam-se em 3.3.1.2.

Assim, com o objectivo de se abrangerem os BEAL mais correntes, foram definidas diversas composições cobrem diferentes classes de resistência e massa volúmica. Para tal, foram considerados betões produzidos com areia de massa volúmica normal e quatro tipos distintos de agregado grosso. Os betões produzidos tiveram em conta diferentes relação água/ligante (a/l), nomeadamente 0,45; 0,55 e 0,65, e diferentes tipos de ligante. Os vários tipos de ligante (ver Quadro 3.8) foram definidos de acordo com a Norma NP EN197-1, de modo a incluir percentagens variáveis, em peso, de sílica de fumo (SF) e cinzas volantes (CZ).

Na produção dos betões foram utilizados agregados pré-saturados, excepto no caso das Argex, em que se afigurava difícil garantir as condições desejadas de partículas saturadas com superfície seca.

Após a produção dos betões, as misturas foram caracterizadas no estado fresco recorrendo a ensaios de abaixamento (cone de Abrams) e a ensaios de massa volúmica, de acordo, respectivamente, com as seguintes normas: NP EN 12350-2 e NP EN 12350-6. Finalmente, os betões foram caracterizados no estado endurecido, em termos de massa volúmica (NP EN 12390-7), resistência à compressão (NP EN 12390-3) e resistência à penetração acelerada de CO₂ (LNEC E391 (1991)).

3.3 Estudo e formulação das misturas

Esta fase assume-se como uma das etapas mais importantes de todo o processo experimental, visto que todas as escolhas e opções tomadas irão ter influência directa no modo como se processa a investigação e os consequentes resultados. Tal como referido anteriormente, as misturas foram definidas tendo em consideração a experiência existente e de modo a abranger vários tipos de ligante, definidos de acordo com o especificado na Norma NP EN 197-1. Paralelamente, foram produzidas misturas de referência de massa volúmica normal, tentando aferir o grau de influência exercido pela incorporação de agregados leves ou adições, bem como analisar o desempenho relativo dos BEAL face aos BAN.

Nos pontos em seguida apresentam-se as principais características dos materiais utilizados, as composições definidas para as misturas, bem como uma breve descrição dos procedimentos utilizados na produção do betão e na sua caracterização no estado fresco e endurecido.

3.3.1 Materiais

Para o presente trabalho foram seleccionados 4 tipos de agregados leves de porosidades bastante distintas: Leca e Argex de Portugal; Stalite dos EUA; Lytag do Reino Unido. Foram ainda seleccionados dois tipos de tipos de areia natural siliciosa e dois tipos de brita calcária para a produção dos BAN de referência.

No Quadro 3.1 resumem-se os tipos de agregados utilizados no trabalho. Indicam-se ainda, no Quadro 3.2, o tipo de cimento, assim como as adições adoptadas neste estudo. Nos subcapítulos em seguida apresenta-se a caracterização dos vários materiais.

Quadro 3.1 - Identificação dos agregados utilizados

Granulometria	Tipo	Designação
Fina	Areia fina	Areia fina siliciosa
	Areia grossa	Areia grossa siliciosa
Grossa	Natural calcário	Bago de Arroz
		Brita 1
	Argila expandida	Leca e Argex
	Ardósia expandida	Stalite
	Cinza volante sinterizada	Lytag

Quadro 3.2 - Identificação do cimento, adições e adjuvante

Granulometria	Tipo	Proveniência
Cimento	CEM I 42,5R	SECIL
Adição I	Cinzas volantes	Central termoelétrica de Sines
Adição II	Sílica de fumo	BASF
Adjuvante	Superplastificante	

3.3.1.1 Caracterização dos agregados

3.3.1.1.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica é um ensaio que permite obter uma noção da dimensão das partículas de uma determinada massa de agregado. Para o efeito, recorre-se a um conjunto de peneiros onde, através dos quais, se procede ao peneiramento de uma quantidade de agregado anteriormente pesada. Os diversos peneiros estão ordenados por ordem decrescente, em função do diâmetro das suas aberturas, sendo assim possível saber a massa retida em cada um dos mesmos. O resultado deste processo é um conjunto de dados (ver Quadro 3.3) que fornecem uma indicação da potencial utilização do agregado testado, tais como uma curva granulométrica onde se representam as percentagens cumulativas não retidas associadas aos respectivos peneiros, a categoria do agregado e o módulo de finura. Este ensaio foi executado seguindo todos todas as estipulações contidas na NP EN 933-1 e na NP EN 12620.

Quadro 3.3 - Resultados obtidos para a peneiração dos agregados

Malha (mm)	Areia Fina	Areia Grossa	Brita 1	Bago de Arroz	Leca	Stalite	Lyttag	Argex 2-4	Argex 3-8F
63	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
31,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
16	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12,5	100,00	100,00	98,61	100,00	98,75	84,83	99,65	100,00	100,00
11,2	100,00	100,00	92,68	100,00	95,78	62,13	97,02	100,00	100,00
10	100,00	100,00	82,27	100,00	91,03	46,64	90,17	100,00	98,18
8	100,00	99,91	48,89	99,91	72,74	18,66	54,61	98,96	26,78
6,3	100,00	99,39	16,84	99,62	47,57	5,18	22,76	37,00	0,69
5,6	100,00	98,95	6,75	94,52	33,87	2,77	14,46	22,42	0,15
4	99,99	97,04	0,87	34,05	4,02	1,03	6,30	5,78	0,05
3,35	99,96	94,96	0,52	18,02	-	-	-	-	-
2	99,93	82,37	0,32	3,23	0,51	0,47	4,15	0,22	0,03
1	99,36	45,83	0,30	1,30	0,36	0,40	3,61	0,10	0,03
0,5	79,78	12,59	0,30	1,12	0,34	0,37	3,39	0,09	0,03
0,25	17,76	2,91	0,30	1,12	0,32	0,32	3,23	0,09	0,03
0,125	0,31	1,12	0,30	1,12	0,29	0,27	2,78	0,09	0,03
0,063	0,03	0,86	0,30	1,12	0,24	0,20	1,90	0,09	0,03
Refugo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dmax	1,00	3,35	10,00	5,60	10,00	12,50	10,00	8,00	10,00
dmin	0,13	0,25	6,30	3,35	4,00	8,00	5,60	4,00	6,30
Categoria	GF85	GF85	Gc 80/20	Gc85/20	Gc 85,20	Gc 85/20	Gc 85/20	Gc 85/20	Gc 85/20
MF	2,00	3,36	6,50	5,60	6,80	6,20	6,20	5,90	6,70

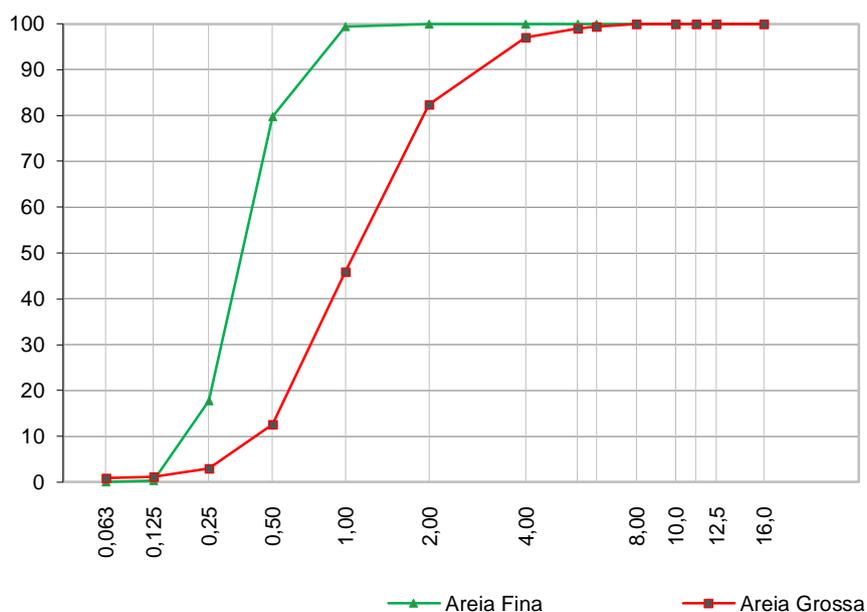


Figura 3.1 – Curvas granulométricas das areias naturais

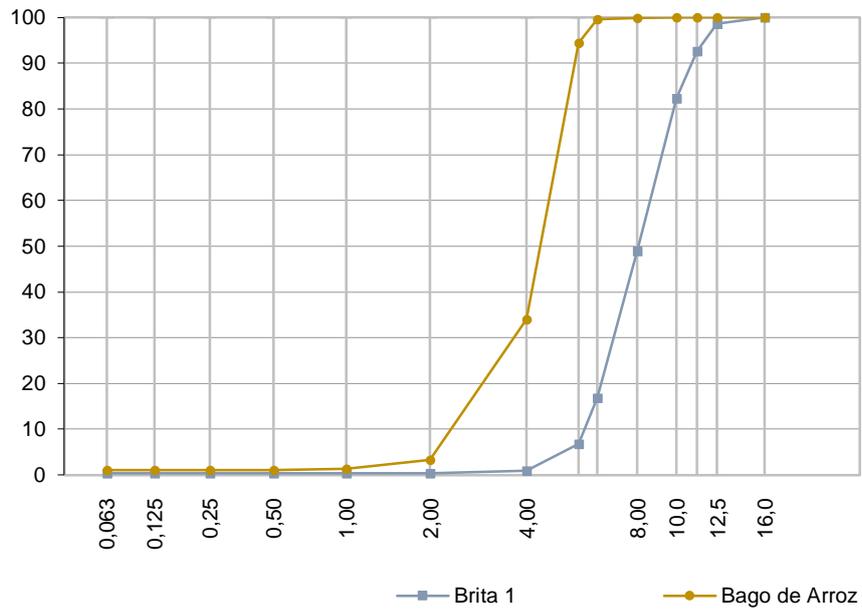


Figura 3.2 – Curvas granulométricas dos agregados naturais calcários

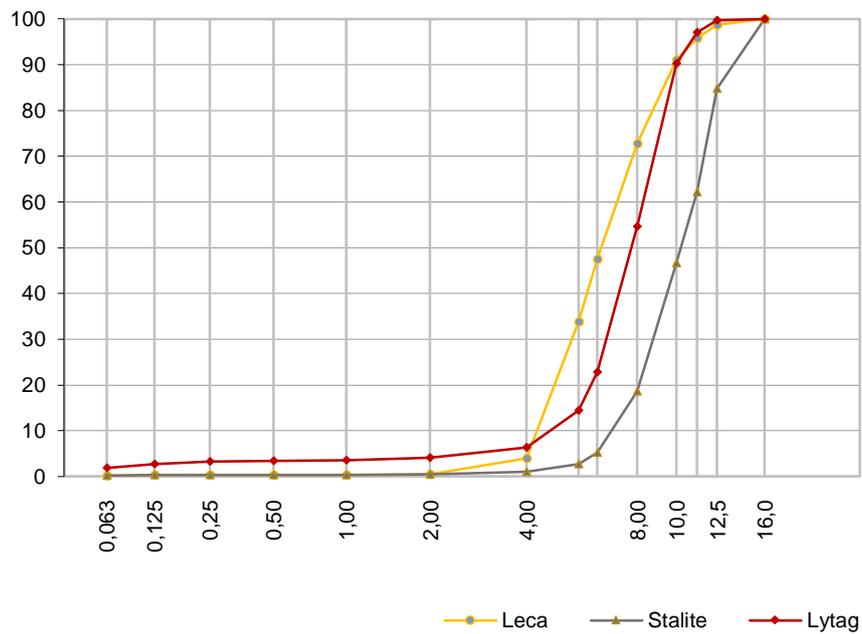


Figura 3.3 – Curvas granulométricas dos agregados leves: Leca, Stalite e Lytag

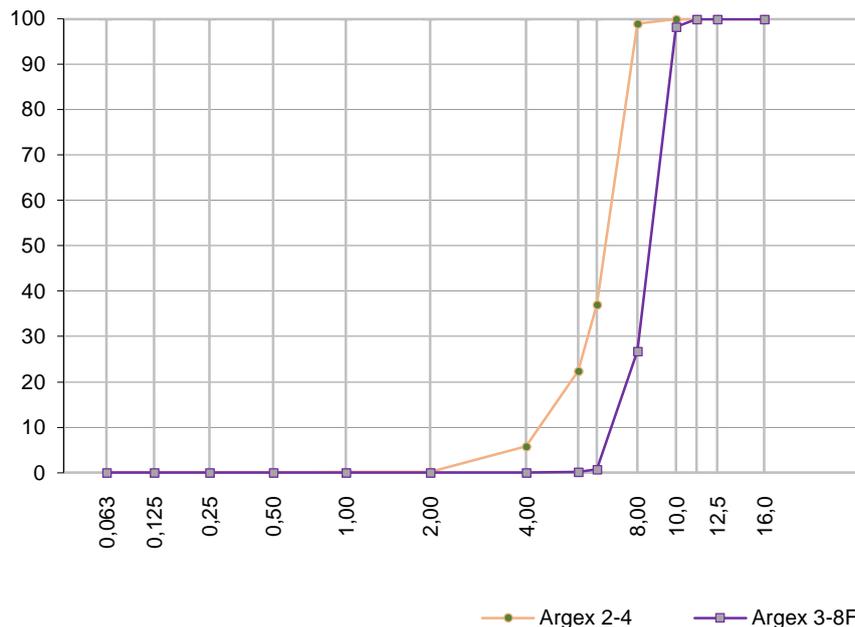


Figura 3.4 - Curvas granulométricas dos agregados leves: Argex 2-4 e Argex 3-8F

3.3.1.1.2 Massa volúmica e absorção de água

A avaliação da massa volúmica dos agregados foi efectuada de acordo com a norma NP EN 1097-6. Basicamente, a determinação da massa volúmica deriva do quociente da massa de agregado seco em estufa e o volume de água ocupado por este quando submerso num picómetro. Através da relação entre as massas secas e saturadas é possível, também, aferir a respectiva absorção de água.

3.3.1.1.3 Baridade

A baridade é uma propriedade que relaciona a massa de uma amostra seca de agregado que é possível acondicionar num volume pré-determinado, segundo a norma NP EN 1097-3. A baridade é o resultado da média dos valores obtidos para três amostras através da aplicação da equação (3.1).

$$b_i = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (3.1)$$

onde,

b_i – baridade da amostra i ;

M_2 – massa do conjunto total;

M_1 – massa do recipiente;

V – volume interior do recipiente.

No Quadro 3.4 e Quadro 3.5, apresentam-se os valores de massa volúmica e baridade e absorção de água às 24h, determinados para cada um dos tipos de agregados seleccionados.

Quadro 3.4 - Propriedades físicas dos agregados de massa volúmica normal

Propriedade		Areia Fina	Areia Grossa	Brita 1	Bago de Arroz
Massa volúmica (kg/m ³)	Agregados secos em estufa	2605	2617	2683	2646
	Agregados saturados com superfície seca	2610	2606	2693	2665
Absorção à água às 24h (%)		0,19	0,26	0,35	0,73
Baridade (kg/m ³)	Amostra seca não compactada	1569	1708	1346	1309
Índice de forma		-	-	-	-
				20	SI ₂₀
					34
					SI ₄₀

Quadro 3.5 - Propriedades físicas dos agregados leves

Propriedade		Leca	Lytag	Stalite	Argex 2-4	Argex 3-8F
Massa volúmica (kg/m ³)	Agregados secos em estufa	1076	1338	1483	669	597
	Agregados saturados com superfície seca	1246	1577	1535	814	712
Absorção à água às 24h (%)		15,81	17,92	3,57	21,38	330
Baridade (kg/m ³)	Amostra seca não compactada	624	750	760	377	19,28
Índice de forma		1	SI ₁₅	0	SI ₁₅	0
				0	SI ₁₅	2
					SI ₁₅	1
						SI ₁₅

3.3.1.1.4 Índice de forma

O índice de forma dos agregados foi determinado de acordo com as normas NP EN 933-4 e NP EN 12620. Esta propriedade obtém-se, como demonstra a equação 3.2, pelo quociente entre a massa de partículas, cuja razão entre o comprimento e a espessura é superior a 3, e a massa total seca da amostra ensaiada.

$$SI = \frac{\sum M_{2,i}}{\sum M_{1,i}} \times 100 \quad (3.2)$$

onde,

$\sum M_{2,i}$ – massa total seca da amostra ensaiada;

$\sum M_{1,i}$ – massa das partículas não cúbicas.

3.3.1.2 Cimento e adições

No Quadro 3.6 e Quadro 3.7, resumem-se as principais características físicas, químicas e mecânicas dos ligantes utilizados, de acordo com os ensaios prévios realizados na empresa SECIL.

Quadro 3.6 – Características do cimento e adições utilizadas

Parâmetro		Cimento I 42,5 R	Cinzas volantes	Sílica de fumo	Filler calcário
Resíduo de peneiração, 45 µm (%)		3,50	13,8	96,4	38,6
Superfície específica mássica de Blaine (cm ² /g)		4388	3909	-	-
Resistência à compressão de argamassa de referência (Mpa)	2 dias	28,67	-	-	-
	7 dias	40,80	-	-	-
	28	52,13	44*	-	-
Índice de actividade (%)		-	84,40	-	-
Expansão (mm)		0,75	-	-	-
		3,64	5,8	2,68	40,69
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)		18,49+4,95+3,61	50,16+25,62+7,14	94,31+ND+0,03	5,05+1,34+0,82
CaO+MgO (%)		63,11+1,62	4,29+0,91	2,13+0,41	50,89+0,57
CaO+MgO livre (%)		0,6+0,8	-	-	-
Massa volúmica (g/cm ³)		3,08	2,17	2,01	2,7
Tempo de presa (min)	início	152,5	-	-	-
	fim	225	-	-	-

*Argamassa CEM I 42,5R+ 25%Cinzas

Quadro 3.7 – Ficha técnico do cimento CEM I 42,5 R

Características	Propriedades	Método de ensaio	Valor especificado	
Físicas	Princípio de presa	NP EN 196-3	≥ 60	min
Químicas	Perda ao fogo	NP EN 196-2	≤ 5%	
	Resíduo insolúvel			
Mecânicas	Resistência à compressão aos 28 dias	NP EN 196-1	≥42,5 ≤ 62,5	(MPa)

3.3.2 Composição das misturas

Tal como referido anteriormente, as misturas foram definidas de modo a abranger diferentes tipos de ligante, definidos de acordo com a Norma NP EN 197-1. No Quadro 3.8, resume-se os diferentes tipos de ligantes considerados no trabalho, com referência à percentagem em massa de cada tipo de adição utilizada.

Quadro 3.8 - Tipos de ligantes adoptados para a campanha experimental

Tipo	Notação	Constituintes*			
		Clínquer	Cinzas volantes	Sílica de fumo	Filler calcário
CEM I	CEM I	100	-	-	-
	CEM II/A-D(1)	94	-	6	-
	CEM II/A-D(2)	91	-	9	-
CEM II	CEM II/A-V	85	15	-	-
	CEM II/B-V	70	30	-	-
	CEM II/A-L	85	-	-	15
	CEM II/B-L	70	-	-	30
CEM IV	CEM IV/A	70	20	10	-
	CEM IV/B	50	40	10	-

* Percentagem em massa

Na definição das misturas estipulou-se que o volume de agregado grosso a incorporar por unidade de volume betão seria de 350 l/m^3 , sendo igual para todas as misturas. Deste modo, é possível estabelecer uma melhor comparação entre as misturas, facilitando a interpretação dos resultados. O valor de 350 l/m^3 foi definido tendo em consideração a experiência adquirida em todos estes trabalhos e o recomendado por Bogas (2011), que sugere valores entre 300 e 400 l/m^3 de modo a maximizar a redução da massa volúmica sem que ocorram efeitos adversos de segregação.

Conforme referido, os betões foram produzidos com diferentes relações a/l de modo a abranger diferentes classes de resistência e de massa volúmica. A selecção de diferentes relações a/l permite ainda avaliar o grau de participação do agregado leve no mecanismo de carbonatação quando a pasta apresenta diferentes níveis de compacidade.

Assim, tendo em consideração diferentes relações a/c, tipos de agregado e teores e tipos de ligante, foram considerados cerca de 37 composições indicadas no Quadro 3.9. A relação a/l indicada no quadro corresponde à água efectiva disponível para hidratação. Optou-se por organizar a informação em função da relação a/l, devido à relevância deste parâmetro na durabilidade dos betões e de modo a facilitar a discussão de resultados no capítulo 4.

Note-se que nem todos os tipos de ligante indicados no Quadro 3.8 foram considerados para os vários tipos de agregado. Isso levava a um esforço experimental demasiado elevado sem acrescentar grande informação adicional. De facto, a forma como as composições foram definidas permite fazer uma análise em separado da influência de cada parâmetro que se pretende estudar, nomeadamente: tipo de agregado; relação a/c; tipo de ligante.

Na formulação dos betões, seguiu-se o método proposto por Bogas (2011) para betões leves estruturais com areias naturais, que tem por base os conceitos de resistência potencial, resistência limite e a optimização da mistura granular com base no método de Faury. Uma descrição pormenorizada deste método é apresentada em Bogas (2011) (2014).

Quadro 3.9 – Composição das misturas

a/l	Agregado	Tipo	Teor de ligante (Kg/m ³)	Volume de agregado grosso (l/m ³)	Volume de areia (l/m ³)		Volume de água (l/m ³)
					Fina	Grossa	
0,45	A.N. Leca Stalite	CEM I	400	350	93,0	217,0	180
		CEM II/A-V			91,2	212,8	
		CEM II/B-V			89,1	207,9	
		CEM II/A-D ¹			92,1	214,9	
		CEM II/A-D ²			91,5	213,5	
		CEM II/A-L					
		CEM II/B-L					
		CEM IV/A			88,8	207,2	
		CEM IV/B			86,4	201,6	
		CEM I			93,0	217,0	
	Argex	CEM II/A-V	400	350	91,2	212,8	180
		CEM II/B-V			89,1	207,9	
		CEM I			93,0	217,0	
		CEM II/A-V	400	350	91,2	212,8	180
Lytag	CEM II/B-V			89,1	207,9	180	
	CEM II/A-D ¹			62,1	144,9		
	CEM I			94,5	220,5		
0,55	A.N. Leca Stalite	CEM I	350	350	94,5	220,5	192,5
		CEM II/A-V			92,7	216,3	
		CEM II/B-V			91,2	212,8	
		CEM II/A-D ¹			93,6	218,4	
		CEM II/A-D ²			93,0	217,0	
		CEM II/A-L					
		CEM II/B-L					
		CEM IV/A			90,9	212,1	
		CEM IV/B			88,5	206,5	
		Argex			CEM I	350	
	Lytag	CEM I	350	350	94,5	220,5	192,5

Quadro 3.9 – Composição das misturas (continuação)

a/l	Agregado	Tipo	Teor de ligante (Kg/m ³)	Volume de agregado grosso (l/m ³)	Volume de areia (l/m ³)		Volume de água (l/m ³)
					Fina	Grossa	
0,65	A.N. Leca Stalite	CEM I	300	350	98,4	229,6	195
		CEM II/A-V			97,2	226,8	
		CEM II/B-V			95,7	223,3	
		CEM II/A-D ¹			97,8	228,2	
		CEM II/A-D ²			97,5	227,5	
		CEM II/A-L					
		CEM II/B-L					
		CEM IV/A			95,4	222,6	
		CEM IV/B			93,6	218,4	
		CEM I			98,4	229,6	
	Argex	CEM II/A-V	300	350	97,2	226,8	195
		CEM II/B-V			95,7	223,3	
		CEM I			98,4	229,6	
	Lytag	CEM II/A-V	300	350	97,2	226,8	195
		CEM II/B-V			95,7	223,3	
CEM II/A-D ¹				97,8	228,2		

3.4 Produção do betão e preparação dos espécimes

3.4.1 Produção do betão

Nos pontos em seguida descrevem-se, sucintamente, os principais passos considerados na produção do betão, nomeadamente, o pré-condicionamento dos agregados, a mistura, a preparação dos provetes e, por fim, a desmoldagem, cura e armazenamento.

3.4.1.1 Pré-condicionamento dos agregados

De modo a controlar a trabalhabilidade dos betões e, sobretudo, garantir a quantidade de água efectiva pretendida nas misturas, os vários agregados foram pré-saturados durante 24h. Após as 24h, os vários agregados foram secos superficialmente com toalhas absorventes de modo a apresentarem-se saturados com superfície seca. Apenas nos betões produzidos com Argex, os agregados foram inicialmente secos e a absorção durante a mistura foi considerada equivalente a 30 minutos de absorção em água, conforme sugerido em Bogas (2011). O erro associado a este procedimento foi verificado após o recolhimento de amostras de betão fresco que foram lavadas sobre um peneiro de 4 mm e posteriormente secas em estufa. A diferença de absorção face ao previsto foi de geralmente inferior a $\pm 0,5\%$. As amostras foram recolhidas cerca de 30 minutos após a realização das misturas. Após a pré-saturação, o agregado foi armazenado em barricas devidamente seladas de modo a conservar as partículas saturadas até à data da sua utilização.

De modo a controlar com rigor a quantidade de água efectiva nas amostras, os agregados finos foram também previamente secos num forno a 100 °C.

3.4.1.2 Mistura

Os betões foram produzidos numa misturadora de eixo vertical cuja descarga se realiza pela face inferior, como ilustra a Figura 3.5. Devido a esta especificidade e de modo a evitar perdas de água durante a mistura, procedeu-se previamente ao barramento da misturadora de uma argamassa fluida de cimento e areia fina.



Figura 3.5 - Betoneira utilizada na campanha experimental

Em geral a mistura requereu o seguinte procedimento: Após pré-saturação dos agregados, estes foram introduzidos na misturadora com a areia e 50% da água de amassadura. Após 2 minutos de mistura, deixavam-se repousar durante 1 minuto, tendo-se adicionado, em seguida, o cimento e parte da restante água e passado mais 1 minuto, o superplastificante com 10% da água. No total, a mistura demorou cerca de 7 minutos. Na mistura com sílica de fumo, esta adição é introduzida depois da mistura, prolongando-se a amassadura por mais 3 minutos.

3.4.1.3 Preparação dos provetes

Para cada mistura foram produzidos: 2 cubos de 100 mm de aresta para determinação da massa volúmica seca, de acordo com a Norma NP EN 12390-7; cubos de 150 mm de aresta para determinação da resistência à compressão, de acordo com a Norma NP EN 12390-3; espécimes de $\varnothing 105 \times 50$ mm, seccionados de cilindros de 250 mm de altura, para determinação da resistência à carbonatação acelerada, de acordo com a especificação LNEC E391 (1991).

A compactação das misturas realizou-se com o auxílio de um vibrador de agulha (ver Figura 3.6), de acordo com a norma NP EN 12390-2, efectuando uma adaptação dos tempos de vibração em função da massa volúmica dos agregados presentes na mistura, resultando obviamente em menores tempos de vibração para agregados leves relativamente aos agregados normais, com o intuito de evitar a ocorrência de fenómenos de segregação.



Figura 3.6 – Vibrador de agulha

3.4.1.4 Desmoldagem, cura e armazenamento

De modo geral, a desmoldagem foi realizada 24 horas após a betonagem. Em seguida, os provetes foram devidamente identificados e conduzidos para uma câmara condicionada com humidade relativa superior a 95%, sendo que os tempos de permanência foram ajustados em função dos ensaios a realizar no estado endurecido. Nos provetes destinados ao ensaio de resistência à compressão, a cura húmida foi prolongada até à idade do ensaio. No caso dos espécimes destinados ao ensaio acelerado de resistência à carbonatação, a cura húmida foi prolongada até aos 7 dias de idade.



Figura 3.7 – Cura dos provetes em câmara húmida

Após esse período, procedeu-se ao corte dos provetes cilíndricos em “bolachas” de 5 centímetros de espessura que, posteriormente, foram colocadas em câmara condicionada com 22 ± 2 °C de temperatura e $50 \pm 5\%$ de humidade relativa até à idade do ensaio.



Figura 3.8 – Armazenamento dos provetes em câmara seca

3.5 Caracterização do betão em estado fresco

Após a realização das misturas, os vários betões foram caracterizados no estado fresco em termos de trabalhabilidade e massa volúmica.

3.5.1 Ensaio de abaixamento

No presente estudo, a consistência dos betões foi medida através do ensaio de abaixamento, imediatamente após a amassadura. O procedimento seguido foi o preconizado na Norma NP EN 12350-2 que consiste no enchimento faseado de um molde tronco-cónico – três camadas apiloadas com 25 pancadas cada – seguido da remoção vertical do cone. O objectivo deste ensaio consiste na medição da altura de abaixamento arredonda ao centímetro, que resulta da diferença entre o ponto mais alto da massa de betão deformada e a altura do molde utilizado.

3.5.2 Massa volúmica

O controlo da massa volúmica no estado fresco foi realizado de acordo com a norma NP EN 12350-6. Este ensaio consiste no enchimento em duas camadas posteriormente vibradas, de um balde metálico com volume interior de 10 l, sendo depois possível através da diferença entre a massa final e inicial calcular a massa volúmica do betão.

3.6 Caracterização do betão em estado endurecido

Em relação à caracterização dos betões no estado endurecido, foram realizados ensaios de massa volúmica, resistência à compressão e resistência à carbonatação em câmara acelerada. Nos pontos em seguida descreveu-se resumidamente os procedimentos utilizados na realização desses ensaios.

3.6.1 Massa volúmica

A determinação da massa volúmica, segundo a norma NP EN 12390-7, realizou-se com recurso ao equipamento apresentado na Figura 3.9. A quantificação do parâmetro em causa foi obtido pela relação entre a massa dos provetes ao ar e submersos em água.



Figura 3.9 – Equipamento utilizado para o ensaio de massa volúmica em estado endurecido

3.6.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada de acordo com a Norma NP EN 12390-3, tendo-se ensaiado, para cada mistura, 4 provetes cúbicos de 15 cm de aresta aos 28 dias de idade. Os espécimes foram sujeitos a uma velocidade de carga de 13,5 KN/s exercida pela prensa ilustrada na Figura 3.10. Na Figura 3.11, é possível visualizar o aspecto final de um dos provetes ensaiados à compressão, evidenciando uma rotura válida de acordo com o estipulado na Norma NP EN 12390-3.



Figura 3.10 – Prensa TONI PACT 3000



Figura 3.11 – Provete de betão após o ensaio de resistência à compressão

3.6.3 Resistência à carbonatação em câmara acelerada

A caracterização da resistência à carbonatação foi realizada de acordo com a norma LNEC E391 (1991). Após a cura dos espécimes em câmara condicionada a 50% HR, procedeu-se à impermeabilização dos topos das bolachas de 50 mm de espessura, tendo-se utilizado, para tal, uma tinta de base acrílica. Este procedimento permite garantir que o fluxo de CO₂ para o interior dos espécimes ocorre apenas de forma unidireccional através das suas faces laterais. Em seguida os espécimes foram expostos numa câmara com atmosfera controlada de 23 ± 3 °C, 60 ± 5 % de humidade relativa e $5 \pm 0,1$ % de CO₂ (Figura 3.12).

Os provetes foram sujeitos a carbonatação acelerada durante 7, 14, 28, 56, 91, 119, 182, 273 e 364 dias. Uma vez concluído o período de exposição, os espécimes foram seccionados, e em seguida aspergidos com o indicador de fenolftaleína. A profundidade de carbonatação foi determinada, com auxílio de craveira digital, a partir de 2 leituras (média e máximo) obtidas em cada uma das 4 faces seccionadas do provete. Para cada idade foram ensaiados dois provetes.



Figura 3.12 – Câmara onde se realizou o ensaio de resistência à carbonatação

Devido à gama de valores em causa, e com o intuito de aumentar o nível de precisão dos resultados, considerou-se que a divisão das bolachas era uma etapa fundamental no estudo, pelo que procurou-se que as fracturas executas com auxílio de um escopro fossem convergentes para o centro da bolacha. Para o efeito, desenvolveu-se um equipamento auxiliar que permitia uma divisão rigorosa dos provetes. Basicamente consiste na utilização de um molde, cujo diâmetro é o mesmo do usado na betonagem dos provetes cilíndricos, onde se serraram duas aberturas de modo a incorporar um varão de aço que possibilita a obtenção rigorosa de duas metades. A consequente divisão destas metades fez-se com recurso a uma malha especificamente soldada. Na Figura 3.13, Figura 3.14 e Figura 3.15 pode-se observar o equipamento previamente descrito, bem como o resultado da utilização do mesmo.



Figura 3.13 – Equipamento para divisão em duas metades de um provete



Figura 3.14 – Malha utilizada para a divisão final dos espécimes



Figura 3.15 – Resultado final do ensaio de resistência à profundidade de carbonatação

A evolução da profundidade de carbonatação, x_c , ao longo do tempo pode ser traduzida pela equação 2.13, em que K_c é o coeficiente de carbonatação obtido através da regressão linear entre x_c e t^n , sendo que n assume o valor de 0,5, equivalente quando as condições de ensaio são mantidas constantes ao longo do tempo, como sucede nos ensaios acelerados .

4 Apresentação e discussão de resultados

Nas secções seguintes apresentam-se os resultados obtidos na campanha experimental descrita no capítulo anterior. Proceder-se-á a uma análise detalhada dos mesmos, tendo em vista a compreensão da resistência à carbonatação de betões estruturais de agregados leves (BEAL), produzidos com diferentes tipos de agregado e ligante.

4.1 Caracterização dos betões em estado fresco

No Quadro 4.1, apresentam-se os resultados decorrentes do ensaio de abaixamento e massa volúmica fresca, efectuados de acordo com o exposto em §3.5.1. e §3.5.2., respectivamente.

Quadro 4.1 – Características físicas e mecânicas dos betões no estado fresco

Tipo de Agregado	Relação		Tipo de ligante	Adição	ρ_{fresca} (Kg/m ³)	ρ_{seca} (Kg/m ³)	$f_{cm\ 28d}$ (Mpa)	$f_{cm\ 28d}/\rho_{seca}$ (x10 ³ m)	Abaix. (cm)	
	a/l	a/c								
0,45		0,45	CEM I	0%	1886,8	1793,7	49,9	27,8	14	
		0,48	CEM II/A-D(1)	6% SF	1778,7	1763,5	45,7	25,9	13	
		0,49	CEM II/A-D(2)	9% SF	1803,0	1750,1	43,8	25,0	16	
		0,53	CEM II/A-V	15% Cz	1830,4	1790,1	43,8	24,5	18	
		0,64	CEM II/B-V	30% Cz	1958,1	1795,0	38,4	21,4	14	
		0,53	CEM II/A-L	15% Filler	1851,6	1784,0	44,0	24,6	15	
		0,64	CEM II/B-L	30% Filler	1856,4	1776,0	36,3	20,4	14	
		0,64	CEM IV/A	10%SF+20%Cz	1853,5	1711,6	40,4	23,6	12	
		0,90	CEM IV/B	10%SF+40%Cz	1795,3	1673,9	28,6	17,1	9	
	Stalite		0,55	CEM I	0%	1844,0	1832,4	41,5	22,7	13
			0,59	CEM II/A-D(1)	6% SF	1874,1	1757,7	42,4	24,1	10
			0,60	CEM II/A-D(2)	9% SF	1844,7	1743,9	39,9	22,9	8
			0,65	CEM II/A-V	15% Cz	1900,0	1803,1	36,7	20,3	18
			0,79	CEM II/B-V	30% Cz	1934,2	1772,1	29,2	16,5	16
			0,65	CEM II/A-L	15% Filler	1910,1	1777,0	34,8	19,6	12
			0,79	CEM II/B-L	30% Filler	1912,6	1761,0	27,2	15,4	12
		0,79	CEM IV/A	10%SF+20%Cz	1877,1	1777,1	32,3	18,2	8	
		1,10	CEM IV/B	10%SF+40%Cz	1860,7	1733,0	21,3	12,3	10	
0,65			0,65	CEM I	0%	1836,0	1779,1	31,9	18,0	14
		0,69	CEM II/A-D(1)	6% SF	1818,1	1757,3	29,0	16,5	7	
		0,71	CEM II/A-D(2)	9% SF	1796,4	1734,5	30,5	17,6	5	
		0,76	CEM II/A-V	15% Cz	1835,9	1803,5	31,8	17,6	16	
		0,93	CEM II/B-V	30% Cz	1843,0	1807,9	27,0	14,9	18	
		0,76	CEM II/A-L	15% Filler	1832,0	1757,4	25,3	14,4	7	
		0,93	CEM II/B-L	30% Filler	1801,0	1777,8	20,8	11,7	5	
		0,93	CEM IV/A	10%SF+20%Cz	1835,0	1752,6	21,7	12,4	4	
		1,30	CEM IV/B	10%SF+40%Cz	1782,0	1746,7	19,6	11,2	5	

Quadro 4.1 - Características físicas e mecânicas dos betões no estado fresco (continuação)

Tipo de Agregado	Relação		Tipo de ligante	Adição	ρ_{fresca} (Kg/m ³)	ρ_{seca} (Kg/m ³)	$f_{cm\ 28d}$ (Mpa)	$f_{cm\ 28d}/\rho_{seca}$ (x10 ³ m)	Abaix. (cm)
Leca	0,45	0,45	CEM I	0%	1960,9	1656,5	37,6	22,7	12
		0,48	CEM II/A-D(1)	6% SF	1892,7	1601,1	34,4	21,5	12
		0,49	CEM II/A-D(2)	9% SF	1904,6	1581,2	33,3	21,1	13
		0,53	CEM II/A-V	15% Cz	1930,1	1594,4	33,5	21,0	12
		0,64	CEM II/B-V	30% Cz	1989,6	1600,4	30,3	19,0	9
		0,53	CEM II/A-L	15% Filler	1899,1	1667,0	32,5	19,5	11
		0,64	CEM II/B-L	30% Filler	1954,7	1622,0	28,9	17,8	10
		0,64	CEM IV/A	10%SF+20%Cz	1903,1	1560,1	31,2	20,0	18
		0,90	CEM IV/B	10%SF+40%Cz	1863,7	1551,4	26,6	17,1	17
	0,55	0,55	CEM I	0%	1959,0	1626,9	32,6	20,0	10
		0,59	CEM II/A-D(1)	6% SF	1939,8	1595,2	31,3	19,6	6
		0,60	CEM II/A-D(2)	9% SF	1915,6	1574,3	29,8	18,9	5
		0,65	CEM II/A-V	15% Cz	1965,3	1621,5	28,7	17,7	11
		0,79	CEM II/B-V	30% Cz	1957,9	1593,4	25,2	15,8	9
		0,65	CEM II/A-L	15% Filler	1950,1	1612,0	30,6	19,0	8
		0,79	CEM II/B-L	30% Filler	1957,9	1612,0	25,8	16,0	7
		0,79	CEM IV/A	10%SF+20%Cz	1973,9	1570,7	26,1	16,6	3
1,10		CEM IV/B	10%SF+40%Cz	1933,3	1563,7	16,9	10,8	4	
0,65	0,65	CEM I	0%	1938,4	1607,3	28,4	17,7	6	
	0,69	CEM II/A-D(1)	6% SF	1893,0	1593,0	27,3	17,1	6	
	0,71	CEM II/A-D(2)	9% SF	1911,4	1576,0	25,9	16,4	5	
	0,76	CEM II/A-V	15% Cz	1968,9	1626,4	24,3	14,9	11	
	0,93	CEM II/B-V	30% Cz	1936,6	1608,4	19,8	12,3	16	
	0,76	CEM II/A-L	15% Filler	1949,0	1610,9	23,6	14,7	15	
	0,93	CEM II/B-L	30% Filler	1936,0	1602,0	18,7	11,7	10	
	0,93	CEM IV/A	10%SF+20%Cz	1917,6	1575,8	21,6	13,7	4	
	1,30	CEM IV/B	10%SF+40%Cz	1914,1	1541,4	14,8	9,6	9	
Lytag	0,45	0,45	CEM I	0%	1996,9	1733,2	41,2	23,8	13
		0,48	CEM II/A-D(1)	6% SF	1912,3	1690,1	38,5	22,8	13
		0,53	CEM II/A-V	15% Cz	1943,3	1676,1	37,1	22,1	18
		0,64	CEM II/B-V	30% Cz	1947,1	1700,5	33,9	19,9	13
	0,55	0,55	CEM I	0%	1978,0	1746,3	37,3	21,4	10
		0,65	CEM I	0%	1948,7	1711,8	30,6	17,9	6
		0,69	CEM II/A-D(1)	6% SF	1900,2	1650,9	28,3	17,1	3
		0,76	CEM II/A-V	15% Cz	1949,9	1721,7	27,7	16,1	10
		0,93	CEM II/B-V	30% Cz	1945,5	1703,4	26,3	15,4	7

Quadro 4.1 - Características físicas e mecânicas dos betões no estado fresco (continuação)

Tipo de Agregado	Relação		Tipo de ligante	Adição	ρ_{fresca} (Kg/m ³)	ρ_{seca} (Kg/m ³)	$f_{cm\ 28d}$ (Mpa)	$f_{cm\ 28d}/\rho_{seca}$ (x10 ³ m)	Abaix. (cm)
	a/l	a/c							
Argex		0,45	CEM I	0%	1635,9	1522,9	26,1	17,1	15
		0,45	CEM II/A-V	15% Cz	1579,2	1430,0	23,7	16,6	17
		0,64	CEM II/B-V	30% Cz	1608,3	1484,8	22,1	14,9	13
		0,55	CEM I	0%	1642,4	1518,4	22,5	14,8	18
		0,65	CEM I	0%	1619,9	1491,3	19,8	13,3	16
		0,65	CEM II/A-V	15% Cz	1649,2	1435,7	18,9	13,1	5
		0,93	CEM II/B-V	30% Cz	1658,7	1447,3	16,0	11,1	18
A.N.		0,45	CEM I	0%	2367,4	2219,5	57,7	26,0	13
		0,48	CEM II/A-D(1)	6% SF	2307,6	2174,5	59,8	27,5	12
		0,49	CEM II/A-D(2)	9% SF	2281,5	2162,8	58,8	27,2	14
		0,53	CEM II/A-V	15% Cz	2343,1	2188,9	53,4	24,4	18
		0,45	CEM II/B-V	30% Cz	2326,8	2202,7	45,7	20,8	11
		0,53	CEM II/A-L	15% Filler	2361,8	2219,0	53,0	23,9	13
		0,64	CEM II/B-L	30% Filler	2350,2	2204,0	42,9	19,5	13
		0,64	CEM IV/A	10%SF+20%Cz	2253,3	2146,5	48,5	22,6	13
		0,90	CEM IV/B	10%SF+40%Cz	2218,8	2126,8	38,0	17,9	16
		0,55	CEM I	0%	2353,0	2199,5	47,8	21,7	10
		0,59	CEM II/A-D(1)	6% SF	2322,7	2186,8	47,0	21,5	2
		0,60	CEM II/A-D(2)	9% SF	2300,7	2166,3	45,0	20,8	2
		0,65	CEM II/A-V	15% Cz	2370,1	2219,2	42,2	19,0	9
		0,55	CEM II/B-V	30% Cz	2336,3	2203,4	36,0	16,3	10
		0,65	CEM II/A-L	15% Filler	2340,3	2202,0	41,7	18,9	4
		0,79	CEM II/B-L	30% Filler	2329,3	2179,0	32,7	15,0	5
	0,79	CEM IV/A	10%SF+20%Cz	2323,3	2178,6	40,1	18,4	3	
	1,10	CEM IV/B	10%SF+40%Cz	2305,4	2135,2	25,9	12,1	5	
	0,65	CEM I	0%	2304,3	2137,0	37,0	17,3	4	
	0,69	CEM II/A-D(1)	6% SF	2345,2	2171,6	38,5	17,7	3	
	0,71	CEM II/A-D(2)	9% SF	2312,9	2156,1	37,3	17,3	1	
	0,76	CEM II/A-V	15% Cz	2349,3	2204,7	32,7	14,8	5	
	0,65	CEM II/B-V	30% Cz	2328,9	2171,9	28,9	13,3	7	
	0,76	CEM II/A-L	15% Filler	2319,1	2158,9	30,2	14,0	4	
	0,93	CEM II/B-L	30% Filler	2320,9	2166,4	23,2	10,7	3	
	0,93	CEM IV/A	10%SF+20%Cz	2305,5	2151,0	27,4	12,7	3	
	1,30	CEM IV/B	10%SF+40%Cz	2313,8	2128,6	20,4	9,6	3	

Em geral, os betões foram produzidos com abaixamentos entre 12 e 16 cm, enquadrados na classe de abaixamento S3. Nos betões com sílica de fumo, associado a elevada superfície específica, o abaixamento tende a ser inferior. Por sua vez, a cinza volante tende a contribuir

para o incremento de fluidez das misturas. A elevada esfericidade das partículas e o seu efeito lubrificante sobre as restantes partículas, são algumas das razões atribuídas para o aumento de trabalhabilidade nas misturas com cinzas (Malhotra 1993, ACI 232R 2003).

A massa volúmica aumentou naturalmente com a diminuição da relação a/c e com a introdução de agregados de menor porosidade. A diferença entre a massa volúmica fresca dos BEAL e a dos BAN tende a ser menos relevante do que a relativa à massa volúmica seca, devido à elevada capacidade de absorção de água dos agregados leves. No entanto, apesar da massa volúmica fresca condicionar na definição da carga permanente, é a massa volúmica seca que melhor traduz a eficiência estrutura dos betões, dado que a água no interior dos agregados não afecta negativamente as propriedades da matriz e tende a ser eliminada ao longo da vida útil dos betões.

4.2 Resistência à compressão e massa volúmica

No Quadro 4.1 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias realizados de acordo com o exposto no subcapítulo 3.6.2, bem como os valores de massa volúmica e eficiência estrutural, traduzida pela relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica.

Tendo em consideração diferentes relações a/c, tipos de agregado e de ligante, a resistência à compressão variou entre cerca de 14,8 a 49,9 MPa nos BEAL e cerca de 20,4 a 59,8 MPa nos BAN, a que correspondem as classes de resistência LC12/13 a LC 40/44 e C12/15 a C45/55, respectivamente. Independentemente do tipo de agregado leve, a resistência dos BAN foi sempre superior à dos BEAL de igual composição. No entanto, verifica-se que nos betões com Stalite essa diferença tende a ser menos relevante, existindo uma menor participação dos agregados na resistência do que aquilo que sucede nos restantes tipos de BEAL estudados.

Considerando apenas os cimentos do tipo CEM I, verifica-se que face ao BAN de igual composição existe uma redução média de cerca de 46 a 55%, 17 a 29%, 23 a 35%, a 13 a 14% na resistência dos BEAL com Argex, Lytag, Leca e Stalite, respectivamente. Esta redução tende a ser menos importante nos betões de maior relação a/l, em que existe uma menor participação do agregado leve na resistência à compressão (Bogas 2014).

Analisando o efeito da relação a/l na resistência à compressão verifica-se que para um aumento de 0,1 na relação a/l, ocorre, em média, uma redução de 3,15, 5,28, 4,67, 7,40 e 10,14 MPa nos betões com Argex, Lytag, Leca, Stalite e agregados normais, respectivamente. A maior redução observada nos betões com agregados de maior massa volúmica demonstra a menor importância das características dos agregados nestes betões, cuja resistência à compressão é maioritariamente governada pela qualidade da pasta e da zona de interface agregado-pasta. Nos betões com agregados de maior porosidade, a rotura ocorre pelo agregado e, como tal, eventuais variações nas características da pasta assumem menor relevância.

Na Figura 4.1 a Figura 4.3, apresenta-se a variação da resistência em função do tipo de ligante para cada tipo de agregado analisado. Em geral, observa-se que independentemente do tipo de agregado e relação a/l, a resistência tende a diminuir com o incremento da percentagem de substituição de cimento por cinzas ou filler calcário.

A reduzida idade de ensaio (28 dias) e o modesto índice de actividade das cinzas volantes (§3.3.1.2) deverão ter contribuído para os resultados obtidos. É possível que na idade de ensaio em questão a cinza volante tenha essencialmente contribuído apenas pelos seus efeitos físicos de filler e nucleação. Ainda assim, por comparação com as misturas com igual percentagem de substituição de filler calcário, cujo o efeito na mistura deverá ser apenas físico, é possível verificar que as cinzas volantes contribuíram para um desenvolvimento ligeiramente superior da resistência à compressão. Tal, levaria a supor que as cinzas teriam igualmente contribuído para a resistência à compressão através da sua capacidade pozolânica. Porém, importa referir que a cinza volante apresenta uma granulometria mais grosseira do que o filler calcário, podendo existir diferenças na forma como ambos contribuem por efeito físico.

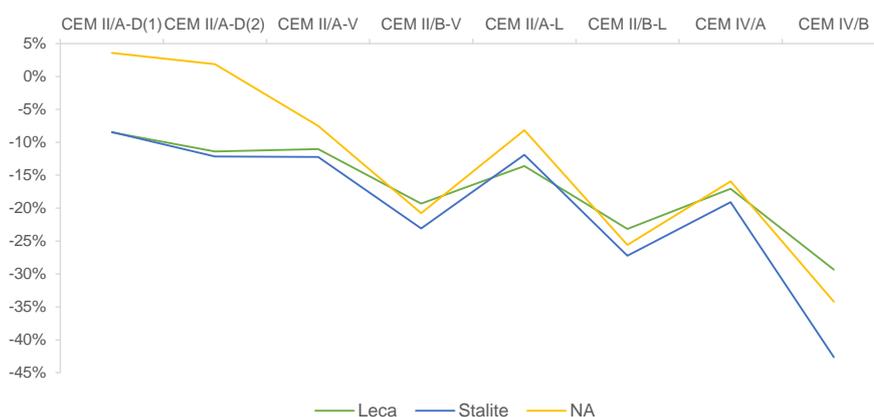


Figura 4.1 - Variação da resistência à compressão em função do tipo de ligante relativamente a betões do tipo CEM I, a/l=0,45

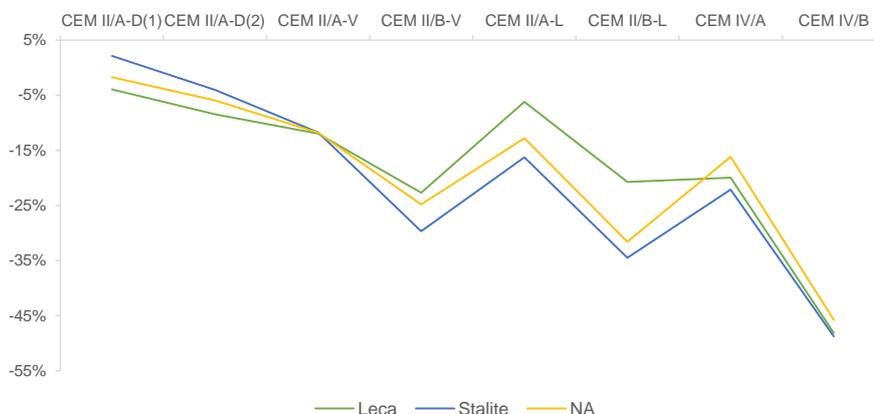


Figura 4.2 - Variação da resistência à compressão em função do tipo de ligante relativamente a betões do tipo CEM I, a/l=0,55

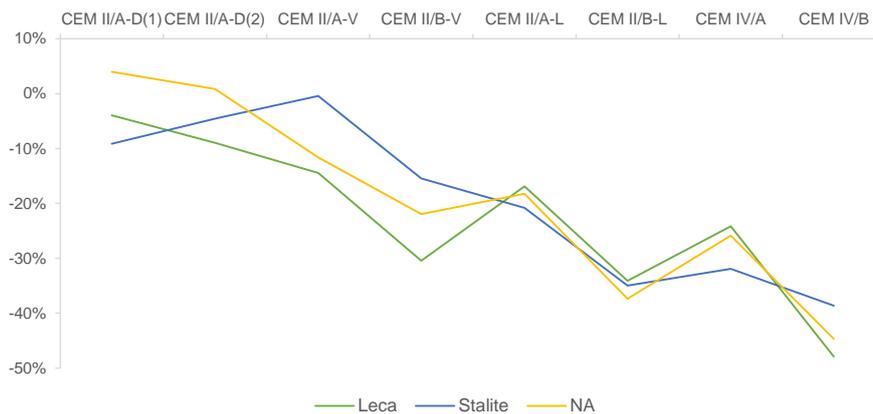


Figura 4.3 - Variação da resistência à compressão em função do tipo de ligante relativamente a betões do tipo CEM I, $a/l=0,65$

A substituição de cimento por sílica de fumo conduziu a resultados semelhantes a ligeiramente inferiores na resistência à compressão. A fraca contribuição da sílica de fumo, ao contrário do que poderia ser esperado, deverá estar relacionada com as dificuldades de dispersão deste tipo de adições. Este problema revelou-se mais sério nos BEAL do que nos BAN, em especial nas misturas de maior a/l , em que não foi utilizado superplastificante. Outros autores também documentam a dificuldade de dispersão da sílica de fumo nos BEAL (ACI 213 2003, Zhang e Gjørsvik 1991b, Chandra e Berntson 2003).

As misturas ternárias com cinzas e sílica de fumo apresentam resistências de acordo com o observado nas misturas com apenas um destes tipos de adições. Destaca-se a elevada redução de resistência observada na mistura com 40% de cinzas e 10% de sílica de fumo em substituição do cimento, a que corresponde uma relação a/c de apenas 0,9, 1,10 e 1,30 nos betões com a/l de 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente.

Tendo em consideração os valores de massa volúmica indicados no Quadro 4.1, foi possível abranger betões leves estruturais enquadrados nas classes D1,6 a D2,0. Dependendo do tipo de agregado, observa-se uma redução média de 15 a 32% na massa volúmica, face aos BAN de igual composição.

A utilização de agregados de maior porosidade (Argex) permite a produção de betões pertencentes à classe D1,6, associados a cerca de 13% de redução média na massa volúmica face aos BEAL com agregados de maior massa volúmica (Stalite), a que corresponde a classe D2,0. No entanto, excepto nos casos onde a massa volúmica é o factor determinante, importa ter em conta a redução imposta na resistência mecânica, ou seja, analisar a eficiência estrutural dos betões produzidos.

Tendo em consideração o Quadro 4.1, para diferentes relações a/c , verifica-se uma redução proporcional da eficiência estrutural com a utilização de agregados leves de maior porosidade. Ainda assim, constata-se que os betões produzidos com agregados leves de menor

porosidade (Stalite) foram, na generalidade dos casos, capazes de conduzir a maiores níveis de eficiência estrutural do que os BAN. Nos BEAL com agregados leves de média porosidade (Leca e Lytag) apenas foi possível obter eficiências estruturais semelhantes à dos BAN para relações a/l inferiores a 0,55. Os BEAL com Argex demonstram ser menos vocacionados para a produção de betões estruturais.

4.3 Resistência à carbonatação

No Quadro 4.2 a 4.4, apresentam-se os valores referentes à profundidade de carbonatação ao longo do tempo, determinados de acordo com o procedimento descrito em §3.6.1. No mesmos quadros, apresentam-se os coeficientes de carbonatação, K_c , a que corresponde a inclinação da recta de regressão que relaciona a profundidade de carbonatação com a raiz do tempo. Nas Figuras 4.4 a 4.8, resumem-se os valores dos coeficientes de carbonatação, K_c , obtidos em função do tipo de agregado, tipo de ligante e relação a/l. Finalmente, em anexo, apresentam-se as diversas curvas de evolução da profundidade de carbonatação em função do tempo e da raiz do tempo, que serviram de base à determinação dos vários coeficientes de carbonatação.

Em geral, verificam-se coeficientes de correlação superiores a 0,9 na relação entre a profundidade de carbonatação e a raiz do tempo (Quadro 4.2 a 4.4). Desse modo, confirma-se que para condições controladas de temperatura e humidade relativa, os ensaios acelerados de carbonatação seguem aproximadamente a lei teórica de evolução da carbonatação estabelecida com base na primeira lei de Fick ($x_c = K_c \sqrt{t}$), em que a difusão é a propriedade de transporte determinante (Kropp, 1995a).

Quadro 4.2 - Resultados dos ensaios de resistência à profundidade de carbonatação ($a/c=0,45$)

Relação a/l	a/c	Tipo de Cimento	Tipo de agregado	Profundidade (mm)					k_c (mm/ano ^{0,5})	R^2
				28d	91d	182d	273d	364d		
0,45	CEM I	Leca	3,6	9,2	10,7	17,6	*	18,1	0,93	
		Stalite	3,3	4,3	7,7	13,1	*	12,6	0,87	
		Lytag	6,6	9,6	14,3	21,8	25,3	23,7	0,96	
		Argex	2,3	5,9	11,8	18,9	*	18,0	0,96	
		AN	3,8	4,6	7,7	8,4	8,7	9,7	0,93	
0,48	CEM II/A-D(1)	Leca	4,3	5,9	8,5	9,8	16,9	13,8	0,83	
		Stalite	5,4	5,8	7,4	15,2	16,9	15,4	0,82	
		Lytag	4,3	6,0	8,8	14,7	16,9	15,6	0,93	
		AN	4,6	6,7	8,0	11,1	11,5	12,2	0,96	
0,49	CEM II/A-D(2)	Leca	4,2	7,1	10,8	19,2	21,5	19,6	0,94	
		Stalite	5,7	9,7	13,0	15,0	18,7	18,3	0,99	
		AN	5,1	7,1	9,8	12,7	15,1	14,7	0,98	
0,45	CEM II/A-V	Leca	7,8	9,3	14,2	19,6	21,9	21,7	0,95	
		Stalite	6,3	10,7	12,0	18,0	23,9	21,4	0,91	
		Lytag	7,3	12,2	19,5	20,8	23,4	24,6	0,97	
		Argex	6,5	14,5	24,5	28,7	33,0	32,7	0,99	
		AN	8,1	10,7	12,2	16,5	20,4	19,8	0,93	
0,64	CEM II/B-V	Leca	11,9	19,2	25,1	31,2	37,8	37,1	0,99	
		Stalite	10,2	13,5	17,5	25,5	29,0	28,4	0,95	
		Lytag	21,6	32,4	45,2	-	-	65,6	0,99	
		Argex	9,3	28,4	36,5	43,3	-	50,9	0,96	
		AN	8,0	15,0	21,9	24,7	29,0	29,4	0,99	
0,53	CEM II/A-L	Leca	5,4	11,8	19,3	20,7	37,2	29,6	0,88	
		Stalite	6,4	11,9	15,3	17,0	21,8	21,4	0,98	
		AN	8,0	11,4	14,4	18,8	20,0	21,1	0,98	
0,64	CEM II/B-L	Leca	15,6	27,0	43,7	-	-	59,0	0,98	
		Stalite	8,5	14,2	25,8	32,7	38,5	36,7	0,99	
		AN	8,5	13,4	20,0	26,1	30,1	29,5	0,99	
0,64	CEM IV/A	Leca	9,5	18,7	30,2	43,4	-	45,1	0,98	
		Stalite	9,1	14,8	27,9	31,3	41,9	38,4	0,97	
		AN	10,3	13,8	21,2	24,9	29,3	29,4	0,98	
0,90	CEM IV/B	Leca	25,1	-	-	-	-	90,8	1,00	
		Stalite	20,7	28,4	-	-	-	61,1	1,00	
		AN	18,2	31,4	47,7	-	-	66,0	0,99	

Nota: * leitura inválida

- carbonatação total

Quadro 4.3 - Resultados dos ensaios de resistência à profundidade de carbonatação ($a/c=0,55$)

Relação a/l	a/c	Tipo de Cimento	Tipo de agregado	Profundidade (mm)							k_c (mm/ano ^{0,5})	R^2
				7d	28d	91d	119d	182d	273d	364d		
0,55	CEM I	Leca	4,7	8,9	16,0	21,2	24,3	32,2	-	35,5	0,99	
		Stalite	4,5	8,0	12,8	15,4	16,1	21,9	-	25,2	0,98	
		Lyttag	7,6	9,8	15,5	20,7	31,5	37,8	-	40,8	0,94	
		Argex	6,2	11,8	16,7	18,7	33,9	36,5	-	41,0	0,92	
		AN	3,6	6,5	6,7	10,5	10,9	15,3	-	17,0	0,91	
	0,59	CEM II/A-D(1)	Leca	5,6	13,0	21,7	27,7	28,1	35,2	-	42,4	0,97
			Stalite	4,8	11,1	15,2	17,4	23,2	25,5	-	31,2	0,98
			AN	5,4	9,0	14,0	14,2	15,6	23,7	-	26,0	0,94
	0,60	CEM II/A-D(2)	Leca	6,2	12,8	23,4	25,8	33,4	39,3	-	46,1	1,00
			Stalite	5,3	10,8	15,6	21,8	24,4	26,9	-	33,6	0,97
			AN	5,4	8,9	14,2	15,5	16,9	24,3	-	27,2	0,97
	0,65	CEM II/A-V	Leca	5,6	17,0	26,9	32,5	-	-	-	55,7	0,98
			Stalite	7,6	11,6	17,0	24,8	26,2	-	-	38,8	0,94
			AN	5,4	11,4	16,9	17,7	21,1	26,7	-	31,6	0,99
	0,79	CEM II/B-V	Leca	9,2	18,1	31,1	-	-	-	-	63,2	1,00
Stalite			9,9	15,8	29,0	30,7	39,7	-	-	56,3	0,99	
AN			10,0	13,8	27,7	29,9	35,5	-	-	52,3	0,99	
0,65	CEM II/A-L	Leca	8,1	17,7	29,3	32,3	42,9	-	-	59,3	0,99	
		Stalite	8,6	11,4	21,4	26,3	31,3	41,3	-	45,8	0,98	
		AN	7,0	11,3	16,2	16,8	26,1	33,2	-	36,0	0,94	
0,79	CEM II/B-L	Leca	9,1	25,1	48,4	-	-	-	-	93,7	1,00	
		Stalite	9,9	20,8	33,8	41,9	-	-	-	71,4	0,99	
		AN	10,2	14,7	30,0	42,2	-	-	-	66,4	0,94	
0,79	CEM IV/A	Leca	11,7	17,6	32,8	41,6	-	-	-	69,5	0,98	
		Stalite	9,1	14,1	25,4	30,0	41,0	-	-	54,7	0,98	
		AN	9,6	13,5	24,8	27,5	40,9	-	-	53,0	0,95	
1,10	CEM IV/B	Leca	16,1	41,9	-	-	-	-	-	144,1	1,00	
		Stalite	14,6	28,2	-	-	-	-	-	102,6	1,00	
		AN	15,7	28,0	-	-	-	-	-	103,5	1,00	

Nota: * leitura inválida

- carbonatação total

Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios de resistência à profundidade de carbonatação ($a/c=0,65$)

Relação a/l	Tipo de a/c	Tipo de Cimento	Tipo de agregado	Profundidade (mm)						k_c (mm/ano ^{0,5})	R^2
				7d	14d	28d	56d	91d	119d		
0,65	CEM I	Leca	7,8	12,0	15,7	16,8	28,1	32,0	-	54,1	0,95
		Stalite	6,7	8,0	10,6	11,4	22,7	*	-	39,6	0,83
		Lytag	6,6	10,8	19,1	22,1	23,1	34,3	-	55,7	0,91
		Argex	8,8	13,3	15,4	32,8	37,2	41,0	-	72,9	0,96
		AN	9,9	10,6	17,8	22,1	28,7	36,0	-	60,2	0,98
0,69	CEM II/A- D(1)	Leca	7,0	9,4	15,0	21,2	27,8	33,6	-	56,0	1,00
		Stalite	8,8	10,8	15,3	16,9	23,3	28,3	-	48,7	0,97
		Lytag	8,8	11,7	17,7	24,4	25,3	33,6	-	57,7	0,96
		AN	6,1	8,3	10,3	13,3	20,3	22,1	-	38,6	0,97
0,71	CEM II/A- D(2)	Leca	9,5	12,7	17,7	20,5	25,0	41,6	-	61,4	0,86
		Stalite	7,7	12,9	14,9	18,0	26,0	31,9	-	53,3	0,96
		AN	7,1	8,8	10,8	14,6	20,4	25,4	-	41,9	0,97
0,65	CEM II/A-V	Leca	10,1	13,8	15,7	28,6	30,1	44,6	-	69,8	0,93
		Stalite	7,6	9,6	15,3	16,9	24,5	27,1	-	48,1	0,98
		Lytag	13,2	16,7	25,8	32,4	34,3	46,2	-	79,3	0,95
		Argex	11,6	18,5	24,6	34,5	-	-	-	88,8	0,99
		AN	7,1	9,2	17,9	19,6	24,7	33,9	-	54,6	0,95
0,93	CEM II/B-V	Leca	17,6	19,5	30,5	-	-	-	-	109,5	0,92
		Stalite	9,8	11,6	14,6	23,5	24,9	27,4	-	52,1	0,96
		Lytag	11,2	15,4	24,6	32,0	47,1	-	-	88,3	0,98
		Argex	15,2	24,2	35,0	-	-	-	-	123,3	1,00
		AN	10,9	14,2	19,0	23,6	34,2	38,0	-	66,6	0,98
0,76	CEM II/A-L	Leca	7,7	11,2	17,0	22,9	30,8	-	-	60,2	1,00
		Stalite	9,1	11,5	16,1	24,7	31,6	38,9	-	64,4	0,99
		AN	7,9	10,1	15,8	24,2	30,8	34,3	-	60,1	1,00
0,93	CEM II/B-L	Leca	14,4	18,6	29,6	47,4	-	-	-	112,7	0,99
		Stalite	10,3	17,1	23,1	32,8	44,2	-	-	85,9	1,00
		AN	11,1	15,5	24,6	36,6	45,3	-	-	90,1	1,00
0,93	CEM IV/A	Leca	13,4	18,7	25,2	37,7	-	-	-	94,7	1,00
		Stalite	11,0	16,6	22,3	33,8	46,1	-	-	87,9	0,99
		AN	10,2	11,3	18,3	25,9	37,2	-	-	69,6	0,98
1,30	CEM IV/B	Leca	22,8	30,8	-	-	-	-	-	159,7	1,00
		Stalite	13,3	23,8	29,1	-	-	-	-	108,5	0,92
		AN	16,7	23,6	34,2	-	-	-	-	122,2	1,00

Nota: * leitura inválida
 - carbonatação total

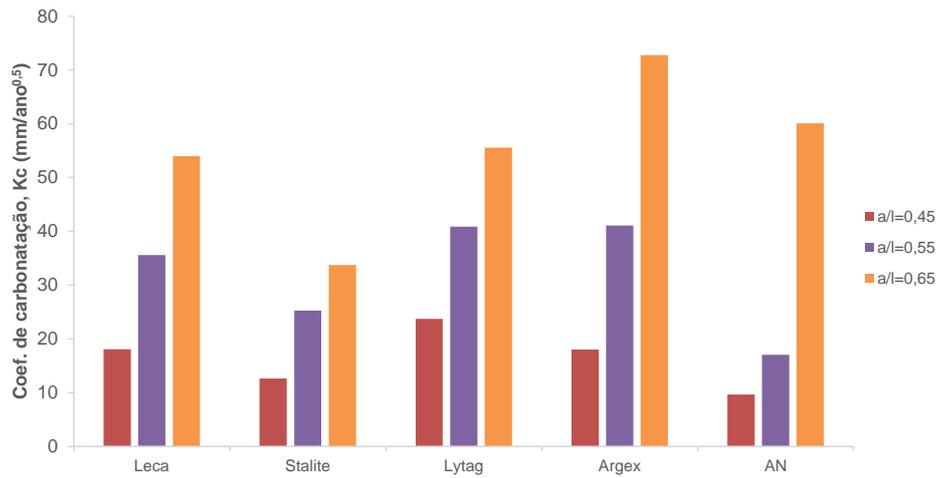


Figura 4.4 - Coeficientes de carbonatação em betões do tipo CEM I

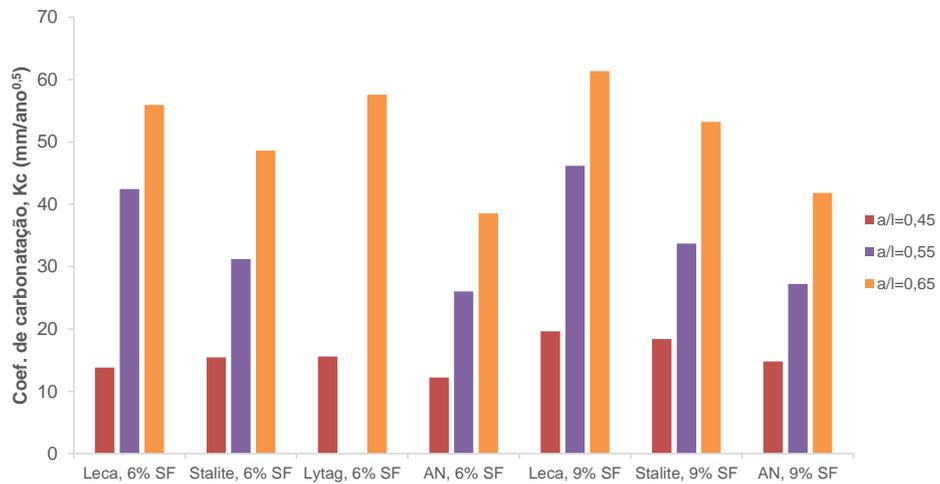


Figura 4.5 - Coeficientes de carbonatação em betões com adição de sílica de fumo

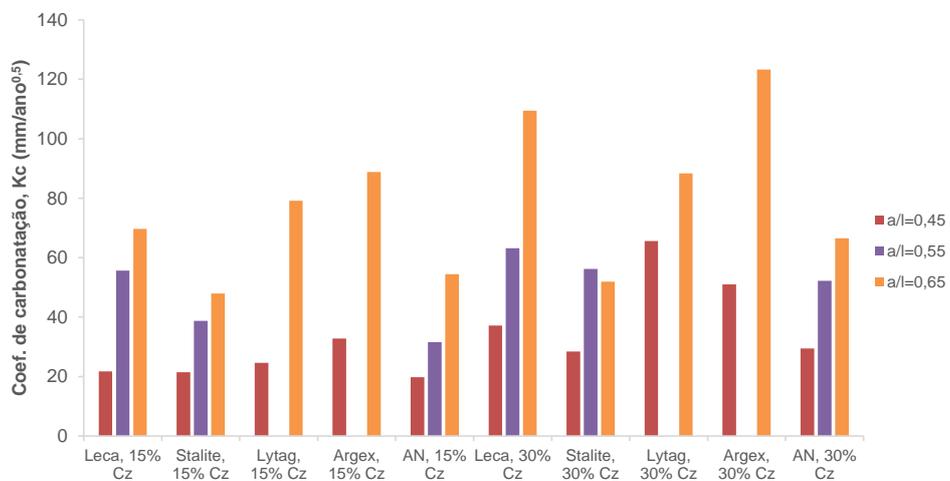


Figura 4.6 - Coeficientes de carbonatação em betões com adição de cinzas volantes

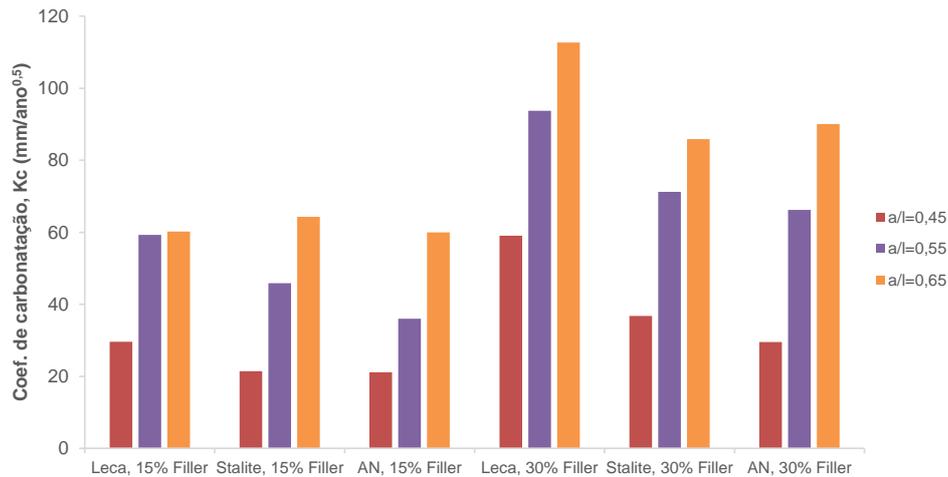


Figura 4.7 - Coeficientes de carbonatação em betões com adição de filler calcário

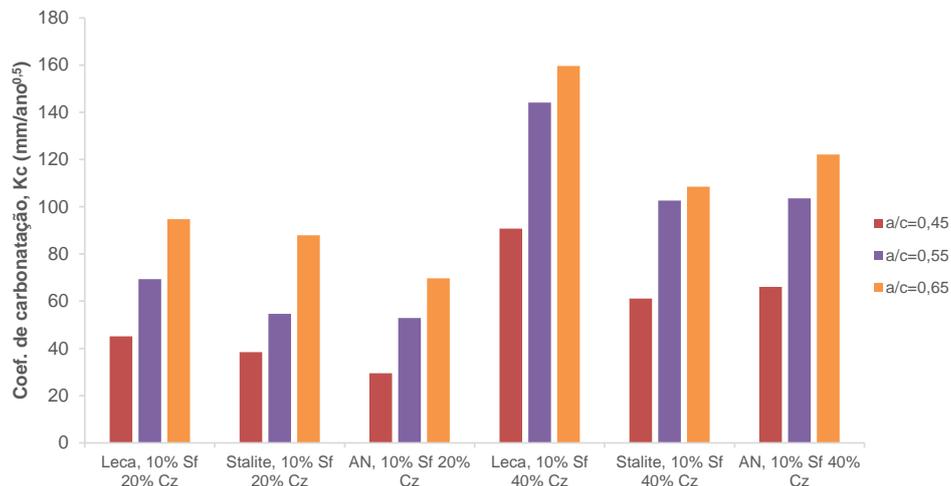


Figura 4.8 - Coeficientes de carbonatação em betões com misturas ternárias

4.3.1 Discussão de resultados

Tendo em consideração as diferentes composições estudadas, o coeficiente de carbonatação, K_c , variou desde 9,67 e os 159,68 $\text{mm/ano}^{0,5}$, sendo possível abranger betões com resistências à carbonatação bastante distintas em função das características da pasta (relação a/c e tipo de ligante) e tipo de agregado. Nos pontos em seguida discute-se a influência de cada um destes factores na resistência à carbonatação dos betões estudados.

4.3.1.1 Influência do tipo de agregado

Os agregados leves são usualmente caracterizados por apresentarem uma estrutura porosa alveolar, cuja dimensão dos poros pode variar desde a escala dos μm à escala do mm . De acordo com Holm and Bremner (2000), os agregados leves apresentam poros de dimensão

entre cerca de 5 a 300 μm , embora na superfície das partículas a sua dimensão seja usualmente inferior a cerca de 50 μm (Bogas 2011). Assim, esta rede de poros, que forma uma estrutura tridimensionalmente interconectável, pode apresentar porosidades duas a três ordens de grandeza superiores à da matriz cimentícia que os rodeia no betão (Bogas 2011, Holm and Bremner, 2000). Desse modo, é possível que a penetrabilidade de substâncias através do agregado possa ser superior à que ocorre através da pasta. Num trabalho experimental, realizado por Zhang e Gjrv (1989), constatou-se que a difusão média através de 3 tipos diferentes de agregados leves foi aproximadamente equivalente à que se observa em pastas cimentícias de relação a/c de 0,9. Embora este estudo tenha sido realizado apenas em partículas seccionadas de agregado leve, não parecem existir dúvidas da maior facilidade de penetração através dos agregados. Assim, desde que o teor em água dos agregados seja pouco significativo, a difusão de CO_2 através destes elementos deverá ser superior do que na pasta. Em condições normais de exposição, em que ocorra a secagem do betão, a água existente no interior dos agregados migra para a pasta e estes tornam-se disponíveis para participar de forma efectiva na difusão. Nas situações em que o betão permanece saturado, como sucede em zonas frequentemente em contacto com a água, a carbonatação é um mecanismo de degradação pouco relevante, independentemente do tipo de betão.

Acresce ainda o facto de, ao contrário do sucedido na matriz cimentícia, os agregados não apresentarem na sua constituição fases capazes de fixar o CO_2 , o que irá contribuir adicionalmente para o aumento da taxa de difusão através dos agregados.

Tal como reportado por Bogas (2011) e igualmente observado por Shulze e Gunzler (1968) e Bandyopadhyay e Swamy (1975), no presente trabalho confirma-se que nos BEAL, a frente de carbonatação tende a ser superior nas regiões das partículas de agregado leve, o que demonstra uma maior difusão através destes elementos do que da pasta, como ilustra a Figura 4.9.



Figura 4.9 – Frente de carbonatação em redor das partículas de agregado leve

No entanto, a penetrabilidade do betão deve ser analisada como um todo, tendo em consideração que os agregados leves se encontram dispersos no betão, sendo devidamente envolvidos pela matriz cimentícia que os rodeia. Nesses termos, a difusão de CO_2 vai ser condicionada pelas propriedades de transporte da pasta e pela forma como esta irá permitir uma

maior ou menor acessibilidade dos agregados. Por esse motivo, na literatura são usualmente documentados diferentes desempenhos relativos dos BEAL face aos BAN, dependendo da relação a/c da matriz cimentícia (Lo, Tang e Nadeem, 2008; Short e Kinniburgh, 1963; Mircea et al., 1994; Bogas 2011).

Importa também perceber como as partículas de agregado se encontram distribuídas na espessura do betão. Devido ao efeito de parede que ocorre nas faces moldadas do betão, existe uma maior concentração de argamassa nestas regiões, formando-se uma primeira camada de apenas alguns milímetros em que a fracção de agregado grosso é menos relevante. Nestes primeiros milímetros de betão, que se pode supor equivalentes a uma espessura compreendida entre cerca de metade e o diâmetro máximo do agregado, a difusão de CO₂ será essencialmente controlada pelas características da argamassa (Figura 4.10). Por outras palavras, nas primeiras idades de exposição dos BEAL, até se atingir uma espessura para a qual se torna efectiva a participação dos agregados leves, a taxa de carbonatação deverá ser equivalente à observada nos betões convencionais de igual composição.

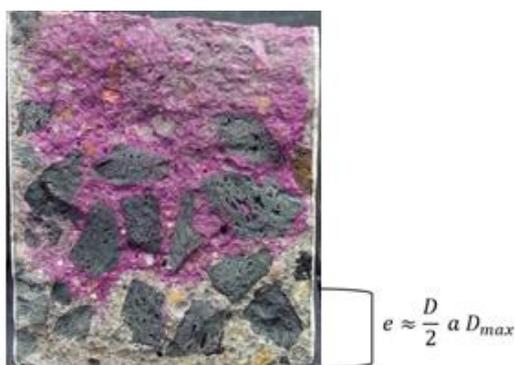


Figura 4.10 - Ilustração esquemática da participação dos agregados na difusão de CO₂ na região afectada pelo efeito de parede junto às faces moldadas

Entre outros motivos, este deverá ser um dos factores que justifica alguns resultados aparentemente contraditórios reportados na literatura, nomeadamente quando se confrontam resultados laboratoriais baseados em ensaios acelerados com análises efectuadas em ambiente real. São vários os autores que reportam menores resistências à carbonatação nos BEAL do que nos BAN tendo em consideração ensaios acelerados (Dhir et al.1989, Short e Kinniburgh 1963; Cembureau, 1974; Vieira 2003; Al-Khaiat e Haque, 1999a). No entanto, existem evidências de excelente desempenho dos BEAL em ambiente real (Holm, et al. 1984; Holm e Bremner, 2000; Thienel, et al. 2000b).

Assim, ao contrário do que sucede nos betões convencionais, a carbonatação nos BEAL deverá ser melhor traduzida através de um modelo bifásico semelhante ao ilustrado na Figura 4.11. Numa primeira fase, até que a participação do agregado seja relevante, a taxa de carbonatação é semelhante à observada nos betões convencionais, ou de forma mais rigorosa, à observada em argamassas de igual composição à utilizada na produção dos BEAL. Na segunda fase, a carbonatação deverá ser afectada pelas características do agregado, estando

associados coeficientes de carbonatação distintos em função do tipo de BEAL. Por outras palavras, na fase 2 os agregados já desempenham um papel importante, pelo que se espera que a velocidade com que se processa o mecanismo de carbonatação se relacione com a massa volúmica dos agregados.

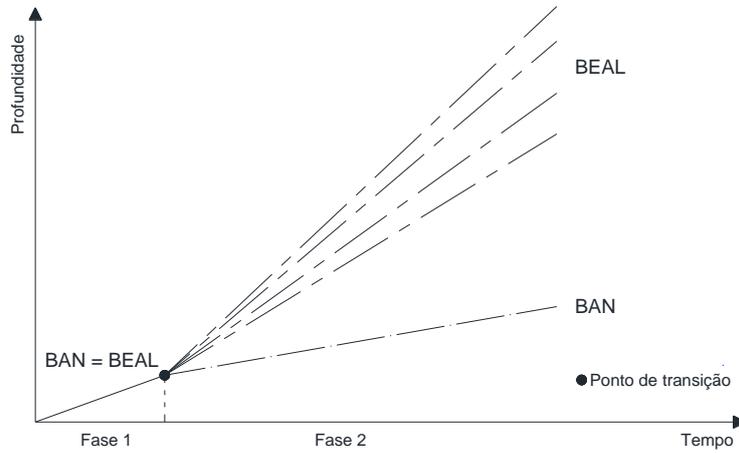


Figura 4.11 – Modelo bifásico proposto

O fenómeno descrito deverá ser tanto mais relevante quanto menor a relação a/c , dado que o tempo afecto à carbonatação dos primeiros milímetros de betão pode ser mais elevado e a participação dos agregados na carbonatação ser mais retardada.

Na Figura 4.12, apresentam-se as curvas de carbonatação obtidas no ensaio acelerado para os betões com cimento tipo CEM I e a/c de 0,45. Como é possível verificar, excepto nos betões leves com agregados de elevada porosidade, a evolução da carbonatação nos BEAL tende a ser semelhante à dos BAN, para profundidades de carbonatação inferiores a 5-10 mm, ou seja, aproximadamente, $\frac{D_{max}}{2}$ a D_{max} . A partir desse ponto, a participação do agregado é mais efectiva e a curva de evolução da profundidade de carbonatação dos BEAL diverge da dos BAN.

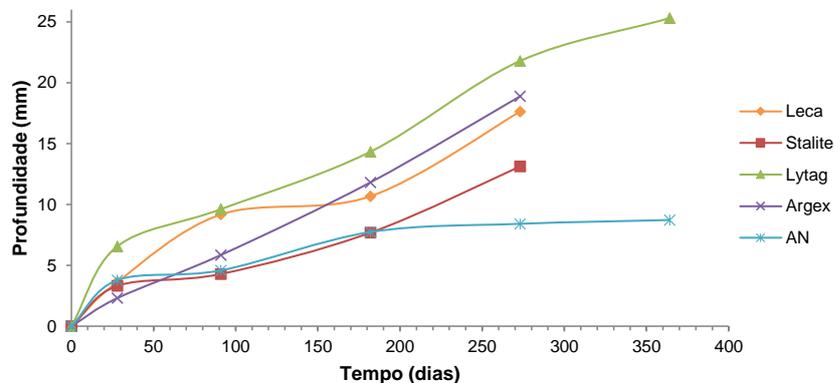


Figura 4.12 - Evolução da profundidade de carbonatação no betão CEM I, $a/c=0,45$

Nos betões com agregados de maior porosidade (Argex e Lytag) é mais difícil identificar o ponto de transição, visto que a participação dos agregados tende a ser logo mais efectiva, mesmo para baixas profundidades de carbonatação. A maior porosidade aberta (Argex) e ausência de orla superficial compacta (Lytag) contribuem para uma activação mais precoce destes agregados no mecanismo de carbonatação. Assim, através de uma interpretação gráfica da Figura 4.12, é possível estimar que o ponto de transição nos betões com Argex/Leca ocorre entre a primeira leitura (28 dias) e a segunda leitura (91 dias), ao passo que nos BEAL com Lytag, a transição parece ocorrer antes da primeira leitura (28 dias). Do mesmo modo, os BEAL com agregados leves mais densos (Stalite) parecem apresentarem o ponto de transição aos 182 dias.

O ponto de transição indicado na Figura 4.11 trata-se de um conceito muito relevante, na medida em que abaixo deste ponto é possível estimar o tempo em que o comportamento dos BEAL é semelhante ao dos BAN. Tendo em consideração que o mecanismo de carbonatação é um processo lento, a consideração de pastas de moderada a elevada compacidade pode ser suficiente para garantir que o desempenho nos BEAL é semelhante ao dos BAN, dentro de um período razoável de vida útil.

Por exemplo, considerando equação 4.6, e tendo em conta o coeficiente de carbonatação de 9,7 mm/ano^{0,5} (Quadro 4.2) obtido para os betões convencionais de $a/c=0,45$, estima-se que, em termos médios, demoraria cerca de 50 anos a atingir-se uma profundidade de carbonatação de 6 mm. Ou seja, para tempos de vida útil médios de 50 anos, poder-se-iam esperar desempenhos semelhantes nos BEAL e nos BAN, dado que a espessura de carbonatação corresponde a cerca de $D_{max}/2$.

Note-se que o conceito do modelo bifásico referido deixa de fazer sentido quando a carbonatação ocorre directamente através da face de betonagem, dado que esta zona não é afectada pelo efeito de parede e está associada à presença de uma elevada proporção de agregado leve. No entanto, em estruturas reais, raramente ocorrem situações em que a face de betonagem se encontra directamente exposta para o meio ambiente, sendo mais normal a exposição de faces moldadas.

Conforme referido, a participação dos agregados leves tende a ser superior em pastas de menor compacidade. Na Figura 4.13, apresentam-se as curvas de carbonatação para os betões com cimento tipo CEM I e relação a/c de 0,55. Neste caso, qualquer dos BEAL apresenta curvas de carbonatação que divergem da dos betões convencionais desde, pelo menos, a segunda idade de ensaio (28 dias). De facto, para esta idade já se atingem profundidades de carbonatação superiores a 5-10 mm e dado que a matriz é menos compacta, o efeito dos agregados torna-se mais relevante. Apenas nos betões com agregados mais densos (Stalite) e com agregados de média porosidade (Leca) é possível identificar o ponto de transição perto dos

7 dias. Neste caso, já é possível observar uma maior resistência à carbonatação nos betões com agregados mais densos, dado que a evolução da carbonatação já envolve de forma mais evidente a participação dos agregados. Nos restantes betões, a evolução da carbonatação é traduzida, desde os primeiros dias, pelo coeficiente de carbonatação em fase 2.

Em suma, parece confirmar-se que quanto maior a relação a/c, mais rapidamente e de forma mais efectiva se torna a participação dos agregados leves na resistência à carbonatação.

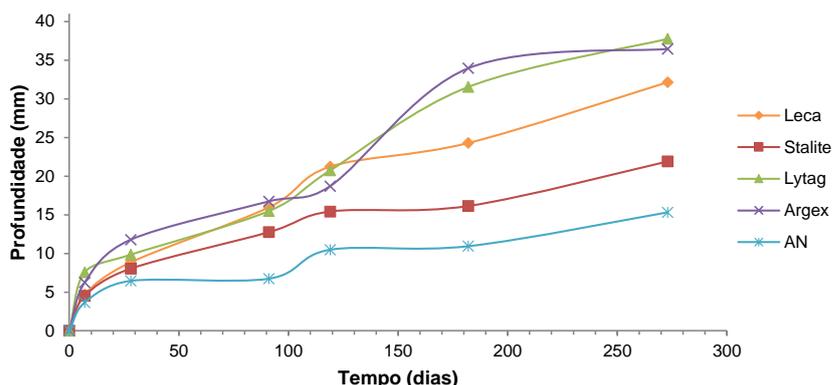


Figura 4.13 - Evolução da profundidade de carbonatação no betão CEM I, a/c=0,55

No entanto, nas misturas de elevado a/c e cimento tipo I, a evolução da carbonatação nos diferentes tipos de betão não ocorreu como seria expectável (ver Figura 4.14). Ocorrendo um comportamento semelhante nos BAN e nos BEAL até, pelo menos, 120 dias de idade e profundidades de carbonatação na ordem dos 30 mm. Verifica-se inclusivamente uma maior resistência à carbonatação dos betões com Leca e Stalite. A melhor qualidade da zona de transição agregado-pasta nos BEAL não deverá só por si ser suficiente para justificar os resultados obtidos. Deve-se salientar que o mesmo não foi constatado por Bogas (2011), em que tendo em conta betões de relação a/c de 0.6 e 0.65, produzidos com diferentes tipos de agregados leves, alguns semelhantes aos utilizados no presente estudo (Leca e Argex), a resistência à carbonatação foi sempre superior nos BAN.

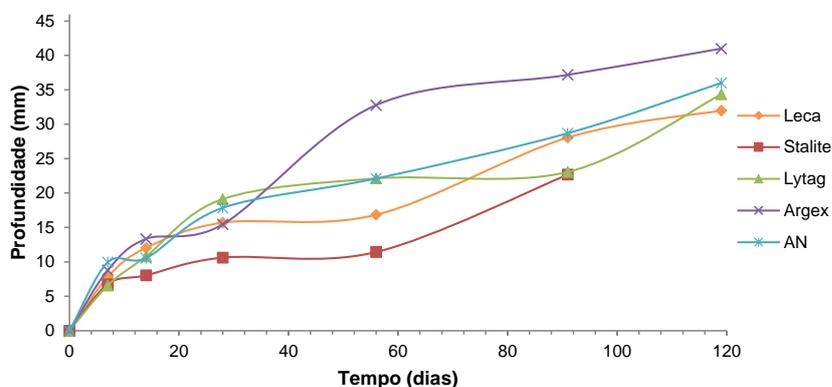


Figura 4.14 - Evolução da profundidade de carbonatação no betão CEM I, a/c=0,65

É possível que tenha ocorrido um problema nas misturas com AN, porém, mesmo quando se tem em consideração, por exemplo, as misturas com cimento tipo CEM II/A-V 65 (Figura 4.15), verifica-se que os BAN continuam a não apresentar melhor comportamento face aos BEAL com agregados mais porosos.

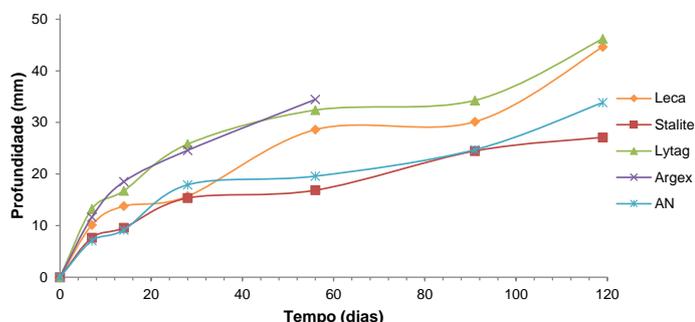


Figura 4.15 – Evolução da profundidade de carbonatação no betão CEM II/A-V, a/l=0, 65

De modo a identificar e perceber melhor o fenómeno em questão, seria interessante analisar o desempenho de provetes constituídos apenas por argamassa, conforme se prevê realizar numa etapa futura de investigação em curso. De qualquer forma, devido à elevada divergência entre misturas, logo a partir dos 7 dias de idade (Figura 4.15) e em função da calendarização das leituras efectuadas, considerou-se que não é possível determinar um ponto de transição, pelo que se pode afirmar que, no presente estudo, o mecanismo de carbonatação para os betões com a/l=0,65, desenvolve-se apenas em fase 2, associado ao coeficiente de carbonatação, K_{c2} .

Tendo em consideração o modelo bifásico, no Quadro 4.5 apresentam-se os coeficientes de carbonatação referentes à fase 1, K_{c1} , e 2, K_{c2} , nas misturas em que foi possível identificar o ponto de transição. Note-se que em muitos casos, o ponto de transição encontra-se entre duas idades de ensaio, o que dificulta a definição rigorosa dos coeficientes de carbonatação. Nestas situações, os coeficientes de carbonatação foram determinados tendo em consideração as leituras prévias (K_{c1}) e posteriores (K_{c2}) ao que se prevê ser o ponto de transição.

Quadro 4.5 - Resumo dos coeficientes obtidos através do modelo bifásico

Relação a/l	Tipo de agregado	Ponto de transição gráfico (dias)	Ponto de transição analítico (dias)	Modelo Monofásico	Modelo bifásico	
				K_c	K_c , Fase 1	K_c , Fase 2
(mm/ano ^{0,5})						
0,45	Leca	28 a 91	38	18,05	13,16	22,33
	Stalite	182	159	12,62	9,41	34,26
	Lytag	<28	i.d.	23,69	23,71	32,69
	Argex	28 a 91	75	17,96	8,37	35,32

Quadro 4.5 - Resumo dos coeficientes obtidos através do modelo bifásico (Continuação)

Relação a/l	Tipo de agregado	Ponto de transição gráfico (dias)	Ponto de transição analítico (dias)	Modelo Monofásico	Modelo bifásico	
				K_c	K_c , Fase 1	K_c , Fase 2
(mm/ano ^{0,5})						
0,55	Leca	7	i.d.	35,53	-	35,53
	Stalite	7	11	25,22	32,60	25,22
	Lytag	<7	i.d.	40,81	-	40,81
	Argex	<7	i.d.	41,02	-	41,02
0,65	Leca	<7	i.d.	54,05	-	54,05
	Stalite	<7	i.d.	39,57	-	39,57
	Lytag	<7	i.d.	55,75	-	55,75
	Argex	<7	i.d.	72,89	-	72,89

Na Figura 4.16, exemplifica-se um caso de determinação dos coeficientes representados na Figura 4.16 para os BEAL produzidos Stalite com cimento do tipo CEM I e relação a/c de 0,45.

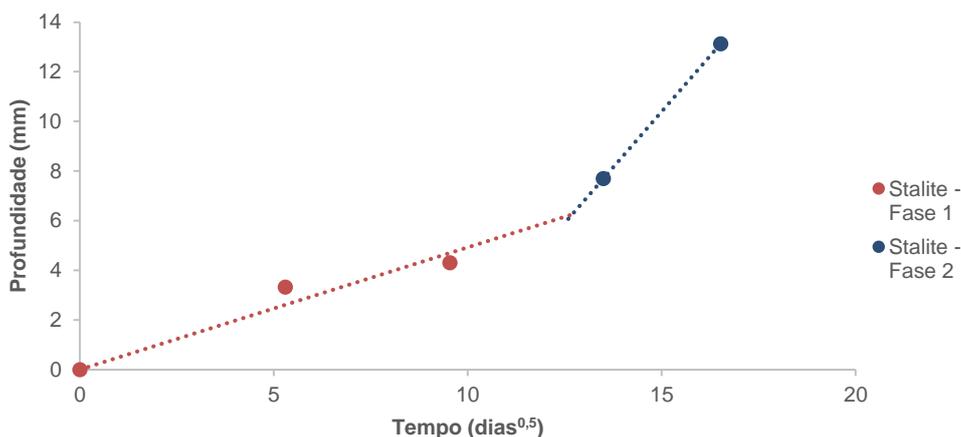


Figura 4.16 – Definição matemática do ponto de transição para o betão do tipo CEM I produzido com Stalite, a/c=0,45

Em geral, para a/c superior a 0,5 não foi possível determinar de forma clara o ponto de transição do modelo bifásico, verificando-se que a curva de carbonatação evolui aproximadamente apenas de acordo com um único coeficiente de carbonatação, neste caso coincidente com K_{c2} . De facto, tal como referido na Figura 4.13 é possível verificar que logo após a primeira leitura de carbonatação, a evolução da carbonatação dos BEAL diverge das dos BAN, independentemente do tipo de agregado. Nos betões com a/c superior a 0,65 este aspecto é ainda mais notório. Assim, nestes casos é mais razoável e conservativo desprezar o desenvolvimento da fase 1 nos BEAL.

Em relação aos vários resultados obtidos importa ainda referir que estes dependem da qualidade do betão e distribuição das partículas junto às faces moldadas. Assim, dado que apenas foi possível analisar um provete por cada composição, existe alguma variabilidade e incerteza na determinação precisa dos pontos de transição.

Por análise dos coeficientes K_{c1} e K_{c2} , no Quadro 4.5, verifica-se existir alguma coerência nos resultados obtidos, que validam o modelo bifásico proposto. Conforme seria previsível, os coeficientes K_{c2} foram, geralmente, superiores aos referentes à fase 1, K_{c1} . De facto, a partir da fase 1, existe um incremento na profundidade de carbonatação devido à participação dos agregados. No entanto, importa referir que à medida que a carbonatação atinge maiores profundidades de penetração tornam-se mais relevantes os efeitos da humidade no provete e, como tal, pode ocorrer uma redução na taxa de carbonatação, que afecta a tendência observada, conduzindo a uma subestimativa de K_{c2} . Embora o modelo bifásico não seja o mais adequado para os BAN, procedeu-se também ao cálculo de K_{c2} para estes betões, tendo sido possível confirmar esta tendência de redução ligeira do K_c ao longo do tempo. Note-se que, conforme referido, o efeito do gradiente de humidade tende a ser ainda mais relevante nos BEAL, dado que estes betões estão associados a tempos de secagem mais prolongados. Existe também congruência na definição dos pontos de transição, verificando-se que quanto maior a relação a/l menor tende a ser o período em que ocorre a passagem da primeira para a segunda fase.

Salienta-se também a uniformidade dos coeficientes de carbonatação referentes à primeira fase, cujos valores tendem a ser semelhantes, independentemente do tipo de agregado, o que demonstra a teoria subjacente à idealização do modelo bifásico.

Em suma, pode-se tipificar um comportamento distinto para os betões com agregados de elevada porosidade ou ausência de orla superficial (Argex e Lytag), agregados de porosidade intermédia (Leca) e agregados de menor porosidade (Stalite).

Nos betões de maior compacidade, as misturas com agregados leves mais densos evidenciaram comportamentos semelhantes ao dos BAN. Nos BEAL de menor compacidade, a participação dos agregados leves torna-se relevante, diferenciando-se claramente dos betões convencionais. Estes resultados corroboram as tendências reportadas por Bogas (2011), tendo em conta também BEAL produzidos com diferentes tipos de agregados e relação a/c .

4.3.1.2 Influência da relação a/l

Por análise das Figuras 4.4 a 4.8, facilmente se constata que a resistência à carbonatação é fortemente influenciada pela relação a/l , verificando-se um aumento de coeficiente de carbonatação em cerca de uma ordem de grandeza quando se faz variar a relação a/l entre 0,45 e 0,65. Conforme sugerido por Power (1956), para relações a/l superiores a 0,45, existe um incremento importante da porosidade capilar e da interconectividade da matriz, traduzindo-se num aumento exponencial da permeabilidade dos betões. A influência da relação a/c na carbonatação é realçada por diversos autores, que consideram este parâmetro um factor preponderante na resistência à carbonatação do betão (Bertolini, et al. 2004, CEB238 1997, Lagerblad 2005, Ho e Lewis 1987, Dinku e Reinhardt 1997).

No entanto, dado que a profundidade de carbonatação depende também de outros factores, como o tipo de agregado e de ligante, não é possível estabelecer relações gerais únicas que traduzam a durabilidade dos betões em função da relação a/c. Ainda assim, na Figura 4.17, verifica-se uma elevada correlação entre a relação a/c e o coeficiente de carbonatação para betões com cimento tipo CEM I e quando se tem em consideração os diferentes tipos de agregado em separado. As expressões lineares que traduzem essas relações para cada tipo de agregado são dadas pelas equações (4.1) a (4.5).

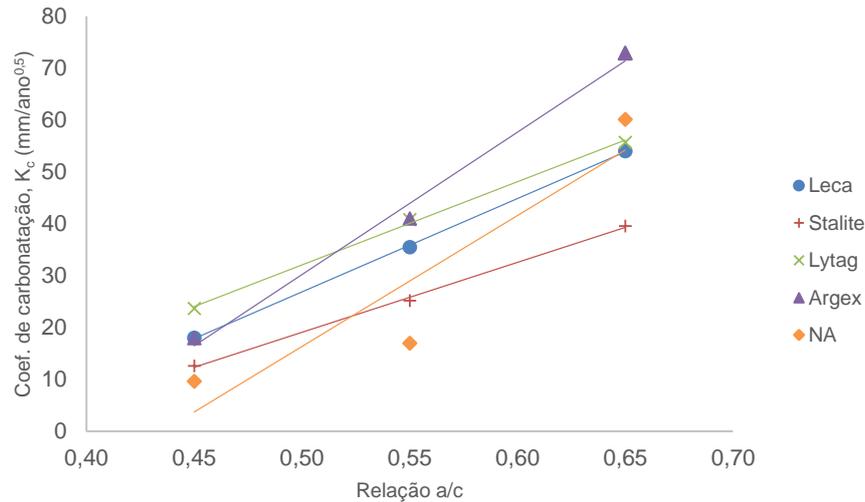


Figura 4.17 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a relação a/c para betões do tipo CEM I

$$Leca: y = 180,00x - 63,12, R^2 = 0,99 \quad (4.1)$$

$$Stalite: y = 134,72x - 48,92, R^2 = 0,99 \quad (4.2)$$

$$Lytag: y = 160,31x - 48,09, R^2 = 0,99 \quad (4.3)$$

$$Argex: y = 274,62x - 107,08, R^2 = 0,99 \quad (4.4)$$

$$NA: y = 252,52x - 109,94, R^2 = 0,86 \quad (4.5)$$

No fib34 (2006) são sugeridos valores indicativos da resistência à carbonatação para betões convencionais com diferentes relações a/c. No Quadro 4.6, apresentam-se os resultados indicados pelo fib34, bem como os valores de resistência à carbonatação obtidos no presente trabalho, ambos definidos apenas para betões convencionais. Em geral, no presente estudo verifica-se a obtenção de resistências à carbonatação superiores, o que deverá estar relacionado com o facto dos valores sugeridos no fib34 (2006) envolverem condições de ensaio diferentes (menores concentrações de CO₂ de 2% e humidades relativas de 65%).

Quadro 4.6 – Valores indicativos de $R_{c_{65}}$ de acordo com o fib34 (2006), (kg.ano/m⁵)

Tipo de cimento	Relação a/c					
	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
CEMI 42,5R	1023	610	466	324	237	-
	-	1930	-	622	-	50

Por sua vez, na Figura 4.18 comparam-se os resultados obtidos com os reportados por Bogas (2011), tendo em consideração agregados semelhantes e ensaios realizados em condições idênticas às do presente estudo. Apesar dos vários resultados serem compatíveis, constata-se que no presente estudo foram obtidos menores coeficientes de carbonatação face aos reportados por Bogas (2011).

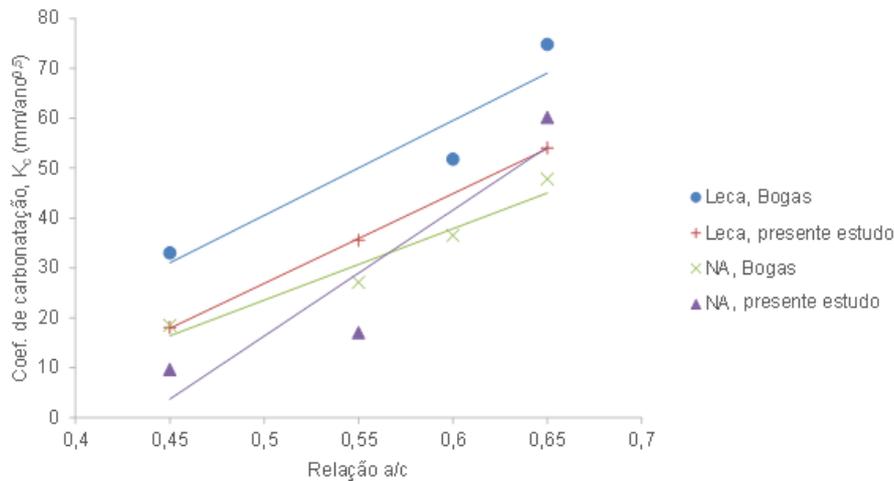


Figura 4.18 - Comparação dos resultados obtidos para betões do tipo CEM I por Bogas (2011)

4.3.1.3 Influência do tipo de adição

Em geral verifica-se um decréscimo proporcional da resistência à carbonatação com o incremento da percentagem de substituição de cimento por adições, independentemente, do tipo de agregado e da relação a/l (Figura 4.19 a 4.27).

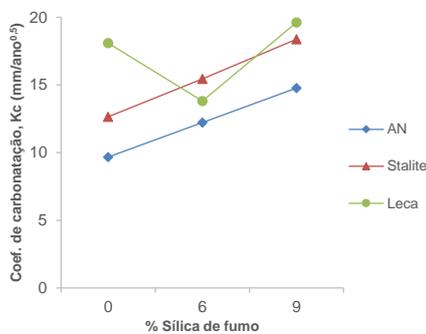


Figura 4.19 – Coef. de carbonatação vs % de substituição por sílica de fumo (a/l=0,45)

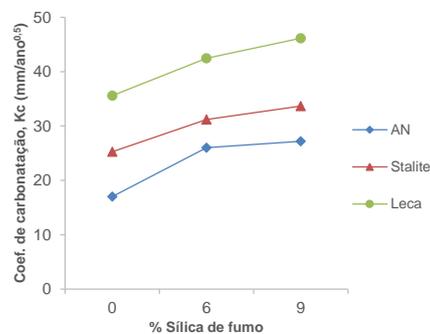


Figura 4.20 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por sílica de fumo (a/l=0,55)

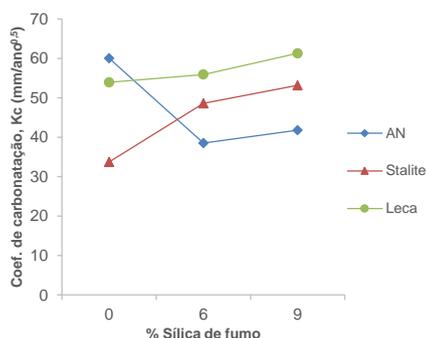


Figura 4.21 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por sílica de fumo ($a/l=0,65$)

Mesmo nos betões com incorporação de sílica de fumo, na larga maioria dos casos, foram obtidos coeficientes de carbonatação superiores aos observados nos betões sem adições, sendo esse incremento proporcional à percentagem de adição (Figura 4.19 a 4.21). Conforme observado anteriormente, a sílica de fumo teve uma contribuição pouco significativa para o refinamento da pasta, devendo esse problema estar relacionado com a dificuldade de dispersão destas adições. Em geral, verificou-se que os betões com sílica de fumo apresentaram resistências à compressão ligeiramente inferiores à dos betões sem adições, o que indicia o desenvolvimento de pastas com maior porosidade. Por outro lado, os betões com adições ao desenvolverem reacções pozolânicas vão consumir hidróxido de cálcio e eventualmente reagir com outros produtos de hidratação do cimento (Lagerblad, 2005). Desse modo, ocorre uma diminuição da quantidade de substâncias carbonatadas e a fixação de CO_2 nos produtos de hidratação do cimento vai ser menos importante. Aliás, a simples substituição de cimento por adições já implica, só por si, uma redução da quantidade total de substâncias carbonatáveis, independentemente do eventual desenvolvimento de reacções pozolânicas. Como consequência, a difusão de CO_2 para o interior do betão tende a aumentar. Visto de outra forma, é necessário menos CO_2 para reduzir o pH do betão para níveis correspondentes à sua carbonatação.

Em suma, conclui-se que a fraca contribuição da sílica de fumo para o refinamento da microestrutura, a par da redução provida na quantidade de material carbonatável, justifica a fraca eficiência evidenciada por este tipo de adições. O menor desempenho em termos de resistência à carbonatação de betões com sílica de fumo é igualmente verificado por outros autores (Khan e Lynsdale 2002; Gjørsv 1995; Papadakis 2000). Segundo Byfors (1985), e o mesmo se pode concluir neste estudo, dado que se consideram usualmente pequenas percentagens de incorporação de sílica de fumo, um eventual efeito negativo na resistência à carbonatação dos betões é pouco significativo.

Nos betões com cinzas volantes, dado envolver maiores percentagens de substituição, é ainda mais notório o decréscimo da resistência à carbonatação (Figura 4.22 a 4.24). Neste

caso para além do fenómeno já referido relacionado com a diminuição da quantidade total de substâncias carbonatáveis, existe ainda uma maior depreciação da microestrutura da matriz.

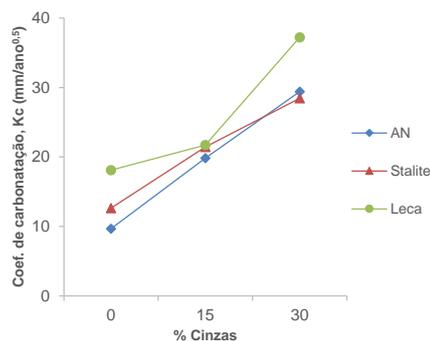


Figura 4.22 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por cinzas volantes ($a/l=0,45$)

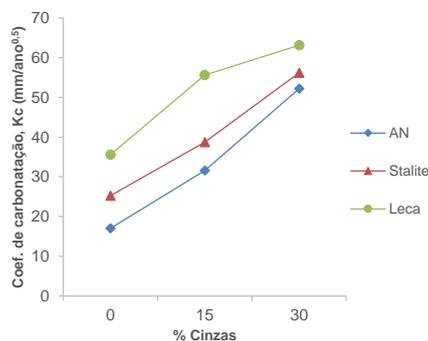


Figura 4.23 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por cinzas volantes ($a/l=0,55$)

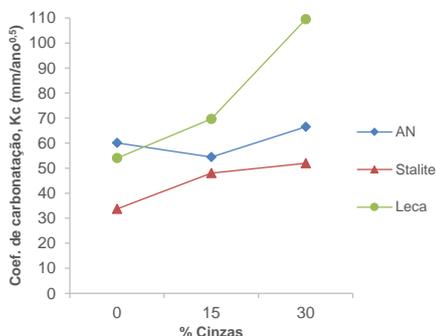


Figura 4.24 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por cinzas volantes ($a/l=0,65$)

Apesar das cinzas contribuírem para a formação adicional de produtos de hidratação, essa quantidade não é comparável com aquela que seria obtida pela utilização de igual massa de cimento, em sua substituição. Assim, ao contrário do que pode ser esperado em betões com sílica de fumo bem dispersa na mistura, a maior redução da resistência à carbonatação nos betões com cinzas está associado ao efeito duplo de redução da quantidade global de substâncias carbonatáveis e do menor refinamento da matriz, quando comparado com o obtido em betões com igual dosagem de ligante, mas apenas constituídos por cimento.

Em relação aos betões com filler calcário, será de esperar que estas adições possam contribuir apenas através do seu efeito físico de filler. Conforme se observa previamente, existe um decréscimo natural da resistência à compressão quando se procede à substituição de cimento por filler calcário, dado existir um menor volume de produtos de hidratação. Essa redução de resistência tende a ser ligeiramente superior à observada nos betões com igual percentagem de substituição de cinzas, visto que não existe a contribuição adicional do eventual desenvolvimento de produtos de hidratação por reacção pozolânica. Por outro lado, apesar do filler calcário não contribuir para a redução de CH na pasta, existe também uma redução da quantidade total de substâncias carbonatáveis, em resultado de parte dos produtos de hidratação do cimento terem sido substituídos por elementos inertes.

Assim, é natural que a resistência à carbonatação tenha decrescido com o aumento da percentagem de substituição de cimento por filler (Figura 4.37 a 4.39), sendo que essa redução foi, em geral, ligeiramente superior à verificada nos betões em que se considera igual percentagem de outras adições. Como tal, conjugando os vários factores referidos anteriormente, o menor efeito físico do filler no melhoramento da estrutura porosa da pasta compensou o não consumo de CH que ocorre neste tipo de betões com adições não pozolánicas.

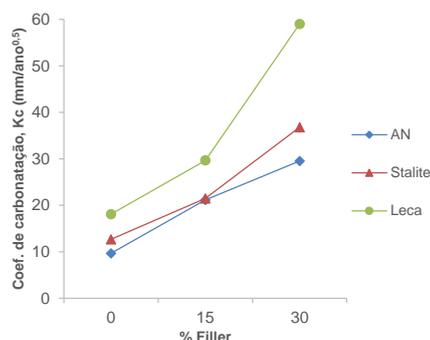


Figura 4.25 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por filler calcário (a/l=0,45)

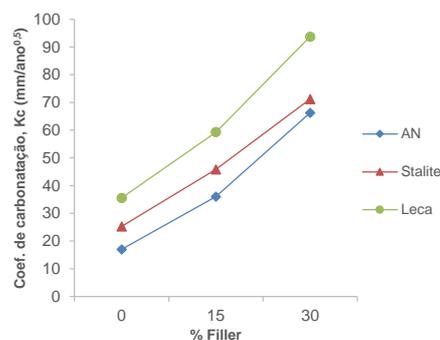


Figura 4.26 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por filler calcário (a/l=0,55)

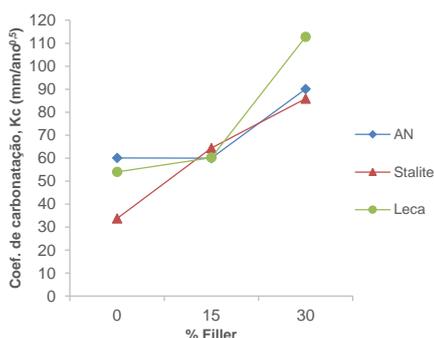


Figura 4.27 - Coef. de carbonatação vs % de substituição por filler calcário (a/l=0,65)

Nas Figuras 4.25 a 4.27 verifica-se um especial incremento do coeficiente de carbonatação nas misturas de elevada relação a/c (0,65) e elevadas percentagens de substituição de cimento por adições (30%). Neste caso, conforme observado no Quadro 4.1, admitindo a não contribuição das adições, a relação a/c das misturas seria de 0,93, para a qual estão associados betões de elevada porosidade e interconectividade (Powers 1958).

Em relação às misturas ternárias, confirma-se também o aumento dos coeficientes de carbonatação com o incremento da percentagem de substituição de cimento por adições (Quadro 4.2), corroborando os resultados obtidos para as misturas apenas com um tipo de adição. Em geral, verifica-se que a mistura com CEM IVA (10% SF+20%CZ) tende a apresentar desempenhos semelhantes a ligeiramente inferiores aos dos betões com igual percentagem de ligante, mas apenas cinzas (CEM II B/V – 30% CZ). Neste caso, o efeito sinérgico das duas adições não beneficiou o comportamento dos betões. Conclui-se assim que, tendo em conta apenas a resistência à carbonatação, não se justifica a incorporação de sílica de fumo em misturas ternárias.

Nas misturas ternárias com elevada percentagem de adições, observam-se grandes aumentos no coeficiente de carbonatação, justificado pelo facto destas misturas estarem associadas a relações a/c muito elevadas, chegando a atingir 1,3 (Quadro 4.1). Interessante é o facto de apesar das pastas apresentarem elevada porosidade e interconectividade, nem sempre se ter observado uma maior participação dos agregados leves no desenvolvimento da carbonatação. Nos BEAL com Stalite, verifica-se inclusivamente que a resistência à carbonatação foi sempre ligeiramente superior à dos BAN de igual composição. Dois factores poderão contribuir para estes resultados. Por um lado, o facto de se considerarem, na melhor das hipóteses, pastas com relação a/c de 0,9 (betão com a/l de 0,45), significa que a porosidade da pasta pode ser superior à do agregado. Note-se que Zhang e GjØrv (1989) verificaram que a difusão através de partículas seccionadas de agregados leves de maior porosidade do que a Stalite era comparável à de pastas de relação a/c de 0,9. Neste caso, a eventual maior difusão de CO₂ através dos agregados poderá ser apenas atribuído ao facto de estes não apresentarem capacidade de fixação de CO₂. Por outro lado, conforme sugerido por vários autores (Fip 1983, Holm e Bremner 2000; Chandra e Berntson 2003), a qualidade da zona de transição agregado-pasta é superior nos BEAL do que nos BAN. Assim, para pastas de muito reduzida compacidade, é possível que volte a ocorrer novamente uma menor influência do tipo de agregado.

Para melhor se compreender a possível contribuição de qualquer uma das adições estudadas na resistência à carbonatação dos betões, importa também analisar as adições como material de adição e não apenas como material de substituição. Por outras palavras, importa analisar o desempenho dos betões com e sem adições, para igual dosagem de cimento.

De modo a se atingir esse objectivo, nas Figuras 4.28 a 4.30 apresenta-se a relação entre o coeficiente de carbonatação e a relação a/c das misturas, tendo apenas em conta a quantidade de cimento incorporada nas misturas. Na elaboração das referidas figuras optou-se por considerar os valores de K_c , embora se possam obter constatações semelhantes para os valores de K_{c1} e K_{c2} .

Em geral, constata-se que existe uma correlação razoável entre o coeficiente de carbonatação e a relação a/c, independentemente do tipo de ligante e do agregado utilizado nas misturas (Figuras 4.28 a 4.30). As Figuras 4.28 a 4.30 permitem realçar a fraca contribuição das adições para a resistência à carbonatação dos betões. O mais interessante é que à parte de pequenas diferenças discutidas nos parágrafos seguintes, algumas eventualmente até mais relacionadas com a variabilidade do próprio ensaio, o comportamento foi sensivelmente idêntico para todos os tipos de ligantes analisados. Somando os efeitos de refinamento da microestrutura e da variação da quantidade total de material carbonatável, para cada tipo de ligante, verifica-se que a incorporação de diferentes tipos de adições tem pouca influência na resistência à carbonatação. Para cada tipo de agregado foi possível estabelecer uma única relação entre K_c e a relação a/c, para coeficientes de correlação superiores a 0,9 (Figuras 4.28 a 4.30).

Nos betões com cinzas, em especial para elevadas percentagens de substituição (30%), são observados desempenhos ligeiramente superiores aos das restantes misturas, para iguais relações a/c. Nestes casos, é expectável que o desenvolvimento adicional de produtos de hidratação e o eventual refinamento da microestrutura tenha compensado os restantes aspectos negativos que resultam da incorporação deste tipo de adições.

Dado que a incorporação de filler como material de adição não afecta a redução da quantidade total de material carbonatável, poderia ser expectável que um eventual melhoramento provocado por estas adições no refinamento da estrutura porosa conduzisse a maiores resistências à carbonatação. Os resultados obtidos não indicam que tenha ocorrido grandes alterações na estrutura porosa da pasta. No entanto, a eficiência do filler pode ser observada quando se compara a resistência à compressão de betões com CEM I e relação a/c de 0,65 com a resistência de betões com CEM II B/L e relação a/c de 0,45 (Quadro 4.2).

Confirma-se um desempenho ligeiramente inferior das misturas ternárias quando comparado com o dos betões com apenas um tipo de adição (Figuras 4.28 a 4.30).

Em face da variabilidade associada à realização dos ensaios de carbonatação e ao facto de apenas ter sido possível medir um espécime por composição e idade de ensaio, não é possível confirmar, em rigor, estas pequenas diferenças observadas nas misturas com diferentes tipos de adições. Futuros estudos serão necessários para analisar melhor estes aspectos.

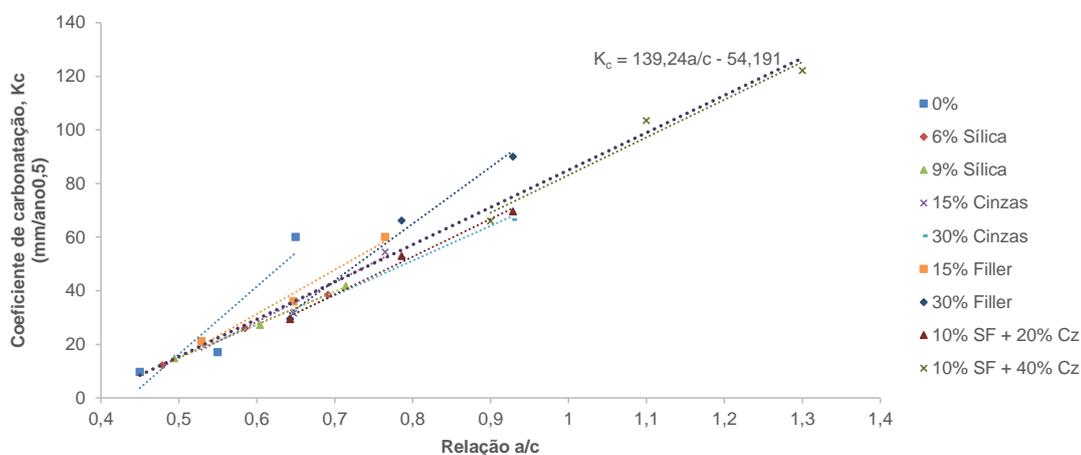


Figura 4.28 - Relação entre os coeficientes de carbonatação, K_c , e a relação a/c, para betões produzidos com agregado normal e vários tipos de ligante

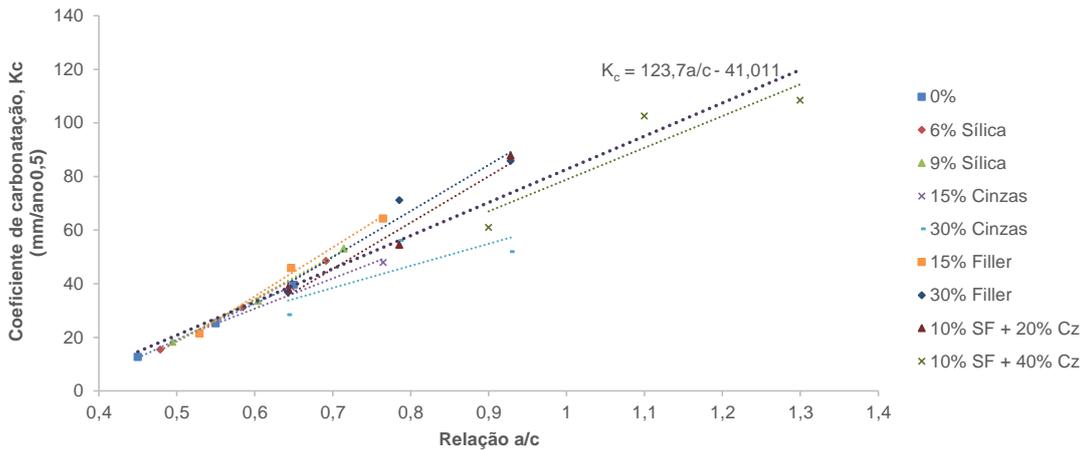


Figura 4.29 - Relação entre os coeficientes de carbonatação, K_c , e a relação a/c , para betões produzidos com Stalite e vários tipos de ligante

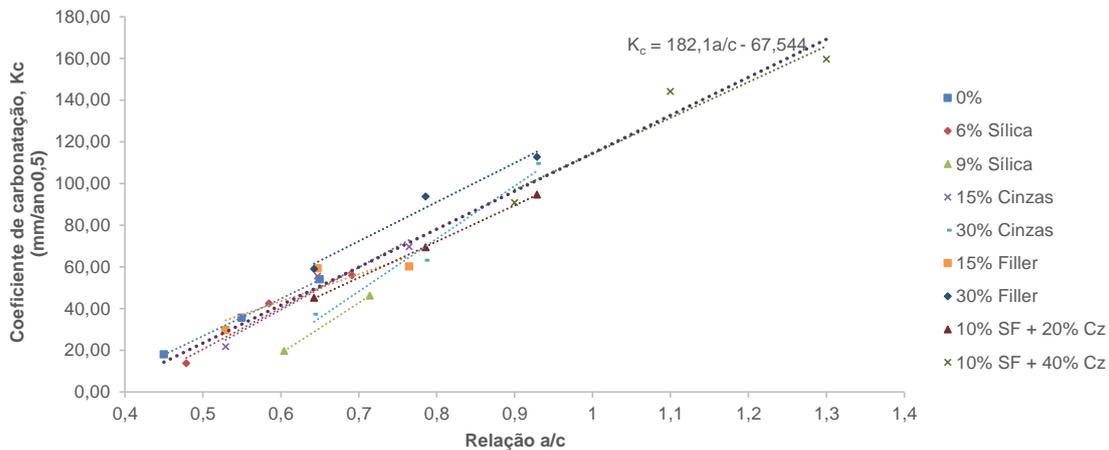


Figura 4.30 - Relação entre os coeficientes de carbonatação, K_c , e a relação a/c , para betões produzidos com Leca e vários tipos de ligante

Em suma, o que importa realçar é que os resultados obtidos no presente estudo sugerem que a resistência à carbonatação de betões com diferentes tipos de adições pode ser tratada, desprezando a sua eventual contribuição. Ou seja, o parâmetro que se verifica ser fundamental na resistência à carbonatação é a relação a/c e não a relação a/l , que tem também em conta a contribuição da adição. De salientar que o presente estudo demonstra que estas conclusões são válidas independentemente do tipo de agregado utilizado na produção dos betões.

4.3.1.4 Estimativa do tempo médio necessário para se atingirem diferentes espessuras de carbonatação

Para que se possa estimar o comportamento real dos betões estudados admitiu-se que os coeficientes de carbonatação resultantes do ensaio acelerado, K_{ca} , relacionam-se com os coeficientes em exposição natural de CO_2 , $K_{c,real}$, através da equação 4.6. Para o efeito,

considerou-se o valor da concentração de CO₂ na atmosfera ($c_{c,real}$) igual a $0,7 \times 10^{-3}$ kg/m³ e o valor de concentração na câmara de carbonatação ($c_{c,acet}$) de 90×10^{-3} kg/m³.

$$K_{c,real} = K_{ca} \times \sqrt{\frac{c_{c,real}}{c_{c,acet}}} \quad (4.6)$$

Assim, de forma grosseira, é possível estimar, através da expressão $x = K_{c,real} \times \sqrt{t}$, a que idade a frente de carbonatação nos betões alcança uma determinada profundidade. No Quadro 4.7, é apresentado como exemplo, uma estimativa do tempo médio necessário para se atingirem diferentes espessuras de carbonatação em betões com cimento tipo CEM I, relação a/c de 0,45 a 0,65 e agregados de argila expandida de elevada (Argex), intermédia (Leca) e reduzida (Stalite) porosidade. Note-se que na análise realizada desprezou-se a importante contribuição de K_{c1} nas misturas de maior compacidade, o que conduz a estimativas, por vezes, demasiado conservativas do tempo associado a uma dada profundidade de carbonatação.

Por análise do Quadro 4.7 pode-se concluir que, mesmo nas misturas de reduzida compacidade (a/c=0,65), são necessários mais de 70 anos para que a carbonatação atinja uma espessura superior a 30 mm, nos BEAL de maior massa volúmica. No entanto, em misturas com agregados leves muito porosos, a mesma espessura poderá ser atingida em apenas menos de 1/3 do tempo. Ainda assim, destaca-se o facto de para misturas correntes de compacidade suficientemente elevada (a/c<0,55), serem necessários períodos superiores a 50 anos para se atingirem espessuras de carbonatação superiores a 30 mm, inclusivamente tendo em conta agregados de elevada porosidade (Argex). Conclui-se assim, que nos casos mais correntes, a carbonatação não deverá ser um factor condicionante na despassivação das armaduras, tendo em conta períodos de 50 anos de vida útil, como é usual. Confirma-se que as diferenças de desempenho entre os diferentes BEAL e face aos BAN diminuem com o aumento de compacidade da matriz.

Quadro 4.7 – Estimado do número de anos necessários para se atingirem diferentes espessuras de carbonatação para os betões do tipo CEM I

Relação a/c	Tipo de agregado	Estimativa do tempo associado a várias profundidades de carbonatação			
		xc= 10 mm	xc= 20 mm	xc= 30 mm	xc= 40 mm
0,45	Leca	39	158	355	631
	Stalite	81	323	726	1291
	Argex	40	159	359	637
	NA	138	551	1241	2206
0,55	Leca	10	41	92	163
	Stalite	20	81	182	323
	Argex	8	31	69	122
	NA	44	178	400	711
0,65	Leca	4	18	40	70
	Stalite	8	33	74	131
	Argex	2	10	22	39
	NA	4	14	32	57

4.3.1.5 Variabilidade dos resultados

A variabilidade dos resultados foi analisada tendo em consideração o coeficiente de variação das leituras realizadas em cada um dos provetes. Ou seja, a variabilidade em causa refere-se apenas às diferenças de penetração ocorridas num dado provete. Visto que em cada idade de exposição foi apenas ensaiado um provete por composição, não é possível aferir a variabilidade entre diferentes provetes.

Tendo em consideração 2400 leituras, verificou-se um coeficiente de variação médio de 7,15%. Existe um ligeiro incremento do coeficiente de variação nas leituras efectuadas a menores idades (Quadro 4.8), que resulta provavelmente da menor uniformidade do betão junto às faces moldadas e da menor precisão associada à medição de pequenas penetrações. No entanto, pode-se considerar que o coeficiente de variação foi relativamente uniforme ao longo do tempo.

Quadro 4.8 - Coeficiente de variação das medições em função da duração do ensaio

Idade do ensaio (dias)	Coef. de variação (%)
7	8,65
14	7,35
28	8,09
56	9,89
90	7,28
120	6,39
180	5,12
270	5,79
365	7,19

4.3.1.6 Resistência à carbonatação versus resistência à compressão

Na Figura 4.31 relaciona-se a resistência à compressão com o coeficiente de carbonatação, para as diversas misturas analisadas no presente trabalho. Como seria de esperar verifica-se uma fraca correlação ($R^2=0,69$) entre estas propriedades, dado que o agregado afecta de forma diferente a resistência à carbonatação e a resistência à compressão. De facto, para uma reduzida relação a/c a participação do agregado na carbonatação tende a ser pouco significativa, ao passo que na resistência à compressão sucede o oposto, aumentando a influência da capacidade resistente do agregado na resistência global de BEAL com pastas de elevada qualidade. Conclui-se assim que a resistência à compressão não deve ser considerada como um critério de avaliação da durabilidade dos BEAL.

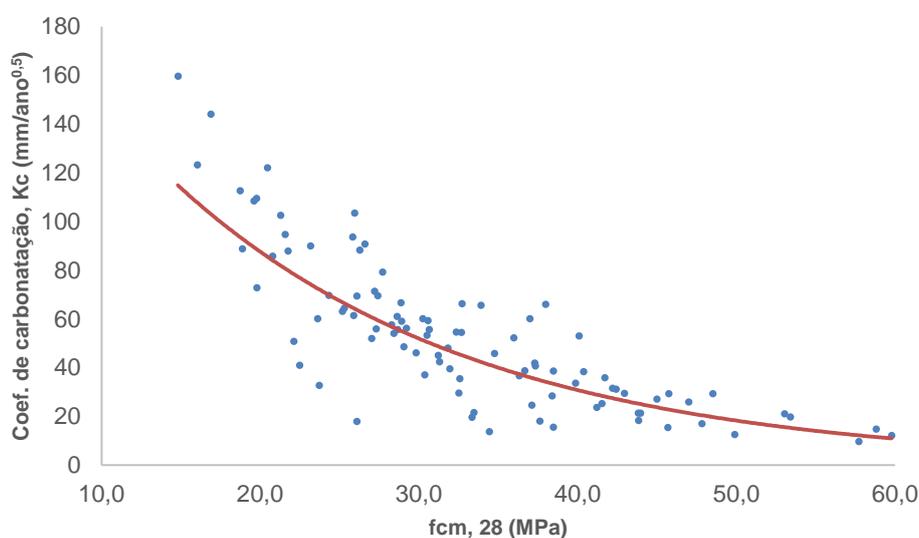


Figura 4.31 – Relação entre a resistência média aos 28 dias e o coeficiente de carbonatação

5 Conclusões

5.1 Considerações finais

O presente trabalho teve como objectivo principal caracterizar a resistência a carbonatação de betões produzidos com diferentes tipos de agregados leves e vários tipos de ligante, analisando ainda o seu desempenho face aos betões convencionais com agregados de massa volúmica normal. De modo a tornar o estudo suficientemente abrangente, foram consideradas misturas com 3 relações a/c (0,45; 0,55 e 0,65), 4 tipos de agregados leves de porosidades distintas (Argex, Leca, Lytag e Stalite) e 9 tipos de ligante. Desse modo, foi possível analisar os casos de BEAL mais correntemente utilizados na construção.

Neste capítulo, apresentam-se, resumidamente, as principais conclusões referentes às propriedades dos betões produzidos e ensaios ao longo da campanha experimental, com maior destaque para o seu comportamento à carbonatação.

No final do capítulo são ainda sugeridas algumas propostas de desenvolvimento futuro com o intuito de fortalecer o grau de conhecimento sobre a durabilidade de betões estruturais produzidos com agregados leves.

5.2 Conclusões gerais

No presente trabalho foram caracterizados betões numa vasta gama de classes de resistência e massa volúmica, produzidos, em geral, com classe de abaixamento S3. A classe de resistência variou entre C12/15 a C45/55 nos betões convencionais e entre LC12/13 a LC40/44 nos BEAL, para classes de massa volúmica D1,6 a D2,0, sendo possível abranger os betões mais correntemente utilizados em edifícios e em cujo mecanismo de carbonatação pode ser relevante.

Dependendo do tipo de agregado leve, verifica-se uma natural redução na resistência à compressão de 13 a 55% face aos BAN. Ainda assim, constata-se que os betões produzidos com agregados de menor porosidade (Stalite) foram, na generalidade dos casos, capazes de conduzir a níveis de eficiência estrutural superiores ao dos BAN. No extremo oposto, os BEAL com agregados de elevada porosidade (Argex) demonstram ser mais adequados para betões estruturais de fraca resistência.

Em geral, constata-se que, independentemente do tipo de agregado e da relação a/l, a resistência à compressão diminui com o aumento da percentagem de substituição de cimento por cinzas ou filer calcário. A incorporação de sílica de fumo conduziu a resistências semelhantes a ligeiramente inferiores às dos betões com apenas cimento tipo I. A reduzida idade de ensaio,

o modesto índice de actividade das cinzas volantes adoptadas e a fraca dispersão atingida pela sílica de fumo nas misturas, são algumas das razões atribuídas aos resultados obtidos.

Em relação aos ensaios de resistência à carbonatação, em geral, constata-se coeficientes de correlação superiores a 0,9 na relação entre a profundidade de carbonatação e a raiz do tempo, o que demonstra a adequabilidade da equação de evolução da carbonatação baseada na primeira lei de Fick em ensaios acelerados com controlo das condições ambientais. Tendo em consideração composições muito distintas, registam-se coeficientes de carbonatação que oscilam entre os 9,7 mm/ano^{0,5} e os 159,7 mm/ano^{0,5}, sendo estes valores essencialmente afectados pela relação a/c, tipo de ligante e tipo de agregado.

Dado que os agregados leves apresentam porosidades superiores à da matriz cimentícia que os rodeia e não possuem capacidade de fixação de CO₂, no presente trabalho confirma-se que a resistência à carbonatação nos BEAL tende a ser inferior à dos BAN, em especial nas misturas com agregados de maior porosidade. Foi possível observar que junto às partículas de agregado leve, a frente de carbonatação tende a ser superior, demonstrando uma maior difusão através destes elementos. Porém, a penetrabilidade do betão deverá ser analisada como um todo pelo que o grau de participação dos agregados leves demonstra também ser condicionado pela pasta e a forma como esta irá permitir uma maior ou menor acessibilidade dos mesmos. De facto, observou-se um incremento na diferença de comportamento dos BEAL face aos BAN com o incremento da relação a/c

Nas faces moldadas do betão, devido ao efeito de parede, existe uma maior concentração de argamassa nessas regiões, que protege os agregados grossos, impedindo a sua exposição directa com o meio ambiente. Essa pequena camada que estima com uma espessura compreendida entre cerca de D e $D_{max}/2$, a difusão de CO₂ é maioritariamente controlada pela argamassa, assumindo menor relevância o tipo de agregado.

Desse modo, no presente trabalho sugere-se a abordagem do desempenho dos BEAL face à carbonatação tendo por base um modelo de comportamento bifásico, em que numa primeira fase, até se atingir uma espessura suficiente que active a participação do agregado, a taxa de carbonatação deverá ser equivalente à observada nos betões convencionais de igual composição. Numa segunda fase, a carbonatação é afectada pelas características do agregado, com o coeficiente de carbonatação a aumentar nos BEAL de menor massa volúmica.

O reconhecimento do comportamento bifásico dos BEAL é de extrema importância e permite justificar alguns dos resultados aparentemente contraditórios que são reportados na literatura. Por exemplo, de forma simplificada, verifica-se que, em média, tendo em conta pastas de relação a/c de 0,45, os BEAL podem desempenhar comportamentos similares aos dos betões convencionais durante mais de 50 anos, que corresponde ao período usualmente considerado para a vida útil das construções mais correntes.

Este fenómeno é tanto mais relevante quanto maior a compacidade da argamassa e menor a porosidade dos agregados leves. em betões com a/c superior a 0,5 ou com agregados de elevada porosidade (Argex, Lytag) a participação dos agregados torna-se mais rapidamente efectiva e o ponto de transição ocorre para idades reduzidas ou envolvendo penetrações pouco significativas. Nestes casos, é razoável e conservativo desprezar o comportamento dos BEAL em fase 1.

Nas misturas com relação a/c muito elevada ($a/c=0,65$) constatou-se um anómalo desempenho dos betões de massa volúmica normal, dificultando a sua comparação relativa face aos BEAL. Ao contrário do observado por outros autores, a resistência à carbonatação nos BAN não foi superior à dos BEAL, mesmo tendo em consideração agregados de média porosidade. Tendo em consideração o comportamento relativo entre as misturas produzidas com agregados leves conclui-se que um eventual ponto de transição ocorre antes da primeira leitura de carbonatação e, como tal, os BEAL são adequadamente apenas traduzidos pela fase 2 do modelo.

O modelo bifásico foi traduzido com base na definição de dois coeficientes de carbonatação, K_{c1} e K_{c2} , sendo que apenas nos betões de maior compacidade ($a/c < 0,5$) é possível identificar claramente o desenvolvimento da primeira fase, e como tal, determinar K_{c1} .

Conforme seria espectável, quando foi possível determinar os valores de K_{c1} , estes foram semelhantes nos BEAL e nos BAN, o que valida o modelo bifásico proposto. O desenvolvimento de gradientes de humidade na espessura dos espécimes pode conduzir a estimativas não conservativas de K_{c2} , tanto nos BEAL como nos BAN, embora os BEAL possam beneficiar mais deste aspecto, dado que estão associados a maiores tempos de secagem.

Em suma, o comportamento à carbonatação dos BEAL é melhor traduzido por um modelo bifásico, sendo possível categorizar 3 desempenhos distintos em função do tipo de agregado: betões com agregados de elevada porosidade ou ausência de orla superficial (Argex e Lytag); betões com agregados de porosidade intermédia (Leca); betões com agregados de menor porosidade (Stalite). Nos betões de maior compacidade, as misturas com agregados leves mais densos são capazes de demonstrar comportamentos semelhantes ao dos BAN.

A resistência à carbonatação é fortemente influenciada pela relação a/l , verificando-se um aumento do coeficiente de carbonatação em cerca de uma ordem de grandeza quando se faz variar a relação a/l entre 0,45 e 0,65. Quando se tem em consideração os agregados em separado, verifica-se uma elevada correlação entre a relação a/c e o coeficiente de carbonatação, concluindo-se que esta propriedade é capaz de traduzir adequadamente o desempenho à carbonatação dos betões, independentemente do tipo de agregado. Para cada tipo de agregado, são sugeridas expressões lineares que permitem estimar a resistência à carbonatação do betão em função da relação a/c .

Foi também analisada a influência da incorporação de adições na resistência à carbonatação dos BEAL. Em geral, independentemente do tipo de agregado e relação a/l, constata-se um decréscimo proporcional da resistência à carbonatação com o incremento da percentagem de substituição de cimento por adições, nomeadamente cinzas volantes, filler calcário ou sílica de fumo. Estas adições para além de, por diferentes razões, não terem contribuído para um refinamento significativo da microestrutura, conduziram a um decréscimo da quantidade total de substâncias carbonatáveis no betão. O efeito negativo parece menos menos significativo nos betões com sílica de fumo devido à baixa percentagem de substituição adoptada nestes casos. Nos betões com filler, embora não ocorra um consumo adicional de C-H e, como tal, de substâncias carbonatáveis, também não existe o desenvolvimento de produtos de hidratação adicional por reacção pozolânica. As misturas ternárias apresentam desempenhos de acordo com o evidenciado pelas misturas com apenas um tipo de adição, não sendo possível confirmar qualquer benefício de um possível efeito sinérgico da adição simultânea de sílica de fumo e cinzas volantes. Tendo em conta apenas a resistência à carbonatação, conclui-se que não se justifica a incorporação de sílica de fumo em misturas ternárias.

Devido à fraca eficiência das várias adições adoptadas no trabalho, nos betões de elevada relação a/c associados a elevadas percentagens de substituição ocorre um especial incremento do coeficiente de carbonatação. Nestes casos, a relação a/c, desprezando a contribuição das adições, pode ser suficientemente elevada para que a porosidade da pasta seja da ordem de grandeza ou superior à dos agregados leves nela envolvidos. Assim, a participação dos agregados na resistência à carbonatação poderá passar a ser novamente menos relevante.

Em geral, foi possível estabelecer uma relação razoável ($R^2 > 0.9$) entre a relação a/c e o coeficiente de carbonatação, independentemente do tipo de ligante e de agregado, o que confirma a fraca contribuição das adições para a resistência à carbonatação, tanto nos BAN como nos BEAL. Em resumo, é possível concluir que a resistência à carbonatação de betões com diferentes tipos de adições pode ser tratada desprezando a sua eventual contribuição e que a relação a/c, e não o parâmetro a/l, deve ser o factor considerado na estimativa e especificação da durabilidade, em termos de carbonatação, dos betões. As conclusões referidas são válidas independentemente do tipo de betão ou agregado.

Verifica-se uma fraca correlação entre a resistência à carbonatação e a resistência à compressão dos BEAL, o que demonstra que esta propriedade não deve ser considerada como critério de durabilidade nos BEAL.

Finalmente, com base nos resultados obtidos no presente trabalho, procedeu-se a uma estimativa determinística do tempo de vida útil associado aos betões estudados. Nesta estimativa, optou-se por de forma conservativa desprezar a importante contribuição de $Kc1$. Em misturas correntes com compacidade suficientemente elevada ($a/c < 0,55$), mesmo tendo em consideração betões produzidos com agregados de elevada porosidade, verifica-se que não são atingidas profundidades de carbonatação superiores a 30 mm, para períodos de vida útil de 50

anos. Desempenhos até 2 a 3 vezes superiores são observados em BEAL com agregados de porosidade baixa a intermédia. Assim, pode-se concluir que tendo em conta casos correntes de aplicação, a carbonatação nos BEAL não deverá ser um factor condicionante para a despassivação das armaduras, pelo menos tendo em consideração períodos usuais de vida útil das construções.

5.3 Propostas para desenvolvimento futuro

A elaboração desta dissertação possibilitou a expansão da informação e do conhecimento ao nível da durabilidade dos BEAL, mais concretamente sobre a resistência á carbonatação. No entanto este estudo poderá ser complementado com informação adicional pelo que, em seguida, sugerem-se alguns temas de desenvolvimento futuro, como por exemplo:

- Avaliar o desempenho em ambiente de exposição real dos BEAL, quer através de espécimes colocados para o efeito, quer através de estruturas existentes;
- Avaliar o desempenho dos BEAL para vários ambientes de exposição;
- Relacionar os resultados obtidos com ensaios expeditos de propriedades de transporte quer em laboratório, quer *in situ*;
- Desenvolvimento adicionais no estudo do tipo de ligante procurando, sobretudo, melhor dispersão da sílica de fumo.
- Produção de argamassas equivalentes à do presente documento e proceder a uma análise comparativa dos resultados.

Bibliografia

Livros, artigos e dissertações

- ACI213R. "Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete." Amer. Concrete Institute, Jan 2003. 38p;
- ACI232R-03. "Use of Fly Ash in Concrete." American Concrete Institute, 2003. 41p;
- Al-Khaiat, Husain, e Naseer Haque. "Strength and durability of lightweight and normal weight concrete." *Journal of materials in civil engineering, Vol. 11, Issue 3, 1999a*: pp 231-235;
- Atis, Cengiz Duran. "Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash." *Construction and building materials, vol 17, 2003*: pp 147-152;
- Bakker, R.F.M. "Initiation period." *In: Corrosion of Steel in Concrete*. P Schiessl, RILEM, 1988. pp 22–54;
- Bandyopadhyay, A.K., e R. N. Swamy. "Durability of steel embedded in structural lightweight concrete." *Materials and Structures, vol.8, nº3, 1975*: pp 203-210;
- Basheer, Lulu, Joerg Kropp, e David J. Cleland. "Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review." *Construction and Building Materials, Volume 15, Issues 2-3, March-April, 2001*: pp 93-103;
- Bertolini, Luca, Bernhard Elsener, Pietri Pedferri, e Rob Polder. *Corrosion of steel in concrete – Prevention, Diagnosis, Repair*. Wiley-VCH, 2004;
- Bilodeau, A., R. Chevrier, V.M. Malhotra, e G.C. Hoff. "Mechanical properties, durability and fire resistance of high-strength lightweight concrete." *Intern. Symposium on structural lightweight aggregate Concrete*. Sandefjord, Norway: Editors: I. Holand, 1995. pp 432-443;
- Bogas, J. A. 2011. "Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida." Tese de Doutoramento do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura da Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico;
- Bremner, T. W., T. A. Holm, e V. F. Stepanova. "Lightweight concrete - a proven material for two millennia." *Proceedings of Advances in Cement and Concrete*. University of New Hampshire. Durham. S. L. Sarkar and M. W. Grutzeck, ed., 1994. pp 37-41;
- Byfors, K. "Carbonation of concrete with silica fume and fly ash." *Oslo: Nordic Concrete research, publication nº 4, 1985*: pp 333-346. - Referido por Tahir Gonen e Yazicioglu (2007);
- Broomfield, J.P. *Corrosion of steel in concrete. Understanding, investigation and repair*. E&FN Spon, 1997;
- CEB238. "New approach to durability design. An example for carbonation induced corrosion." *Bulletin d'information nº238*. Lousanne: Comite Euro-international du béton (CEB), May de 1997. 138p;

- CEB-FIP. "Lightweight Aggregate Concrete - CEB-FIP Manual of Design and Technology." Comité Euro-international du béton (CEB) and Fédération internationale de la précontrainte (FIP). The Construction Press, England, 1977. 169p;
- Cembureau. *Constructions en Betons Leger*. Association Européen du Ciment, Paris, 1974;
- Chandra, Satish, e Leif Berntsson. *Lightweight aggregate concrete. Science, Tevhnology and applications*. Noyes publications-William Andrew Publishing, USA, 2003;
- Cortês, João Filipe Martins. 2014. "Resistência à penetração de cloretos de betões estruturais de agregados leves Engenharia Civil." Instituto Superior Técnico;
- Dhir, R. K., P.C. Hewlett, e Y.N. Chan. "Near surface characteristics of concrete: intrinsic permeability." *Magazine of concrete research*, vol 41, nº 147, 1989 : pp. 87-97;
- EuroLightConR2. "LWAC Material Properties, State-of-the-Art." "European Union – Brite EuRam III, BE96-3942/R2, December, 1998. 111p;
- FIP. "FIP manual of Lightweight aggregate concrete." Fédération internationale de la précontrainte (FIP), second edition, Surrey University Press, 1983. 259p;
- Gao, Yingli, Ling Cheng, Zheming Gao, e Shiyong Guo. 2013. "Effects of different mineral admixtures on carbonation resistance of lightweight aggregate concrete." *Construction and Building Materials* 43. Elsevier Ltd: 506–10. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013;
- GjØrv, Odd E. "Effect of condensed silica fume on steel corrosion in concrete " *ACI materials Journal*, nº92-M60, 1995: pp 591-598;
- Hammer, T.A., e E. A. Hansen. "Water permeability of LWAC." *Second International Symposium on structural lightweight aggregate concrete, 18-22 June*. Kristiansand, Norway: Editors: S.Helland et al, 2000. pp 562-573;
- Haque, M. N., H. Al-Khaiat, e O. Kayali. "Strength and durability of lightweight concrete." *Cement and Concrete Composites Volume 26, Issue 4*, 2004: pp 307-314;
- Ho, D.W.S., e R.K. Lewis. "Carbonation of concrete and its prediction." *Cement and Concrete Research, Volume 17, Issue 3*, 1987: pp 489-504;
- Holm, T.A., e T.W. Bremner. "High strenght low permeability garage rehab concrete." *Materials performance and prevention of deterioration and failures, proceedings*. Atlanta, GA. : Medivision, ASCE, 1992;
- Holm TA, Bremner TW, Newman JB. Lightweight aggregate concrete subject to severe weathering. *Concr Int, ACI*, vol. 6, 1984. pp 49–54;
- Kashino, N. "Investigation into the Limit of Initial Corrosion Occurrence in Existing Reinforced Concrete Structures." *3rd International Conference on the Durability of Building Materials and Components, Espoo, Vol 3, August*. 1984. pp 176-186;
- Khan, M.I., e C.J. Lynsdale. "Strenght, permeability, and carbonation of high-performance concrete." *Cement and Concrete Research, vol 32*, 2002: pp 123-131;
- Kropp, J., Hubert K. Hilsdorf, Horst Grube, Carmen Andrade, e Lars-Olof Nilsson. "Transport mechanisms and definitions." In *Rilem Report 12 – Performance Criteria for Concrete Durability*, de Edited by J. Kropp and H. K. Hilsdorf, pp 4-14. State of the art

- report by rilem technical committee TC 116-PCD, Performance of concrete as a criterion of its durability. E&FN Spon., 1995;
- Kropp, Jörg. "Chlorides in concrete." In *Rilem Report 12 – Performance Criteria for Concrete Durability*, de Edited by J. Kropp and H. K. Hilsdorf, pp 138-164. State of the art report by rilem technical committee TC 116-PCD. Performance of concrete as a criterion of its durability. E&FN Spon., 1995b;
 - Kropp, Jörg. "Relations between transport characteristics and durability." In *Rilem Report 12 – Performance Criteria for Concrete Durability*, de Edited by J. Kropp and H. K. Hilsdorf, pp 97-137. State of the art report by rilem technical committee TC 116-PCD, Performance of concrete as a criterion of its durability. E&FN Spon., 1995a;
 - Lagerblad, B. "Carbon dioxide uptake during concrete life cycle - state of the art, CBI report." Suécia, 2005;
 - Lo, T.Y., W.C. Tang, e A. Nadeem. "Comparison of carbonation of lightweight concrete with normal weight concrete at similar strength levels." *Construction and Building Materials, Volume 22, Issue 8*, 2008: pp 1648-1655;
 - Longuet, P. ; Burgoen, L. e Zelwer, A.. La Phase Liquide du Ciment Hvdraté. *Revue Materials and Construction.*, N51676P, 1973, pp 35-42;
 - Lydon, F. D. "Effect of coarse aggregate and water/cement ratio on intrinsic permeability of concrete subject to drying." *Cement and Concrete Research, Volume 25, Issue 8*, 1995: pp 1737-1746;
 - Malhotra, V. M. "Fly ash, slag, silica fume, and rice-husk ash in concrete: a review." *Concrete International*, 1993: pp 23-28;
 - Maruyama, I., M. Kanematsu, T. Noguchi, H. Iikura, a. Teramoto, e H. Hayano. 2009. "Evaluation of water transfer from saturated lightweight aggregate to cement paste matrix by neutron radiography." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 605 (1-2)*: 159–62. doi:10.1016. 2009;
 - Mehta, P. Kumar, e Paulo J.M. Monteiro. *Concrete. Microstructure, properties and materials*. Third edition, Mc Graw Hil, 2006;
 - Mircea, Doina, Adrian Loani, Mihai Filip, e Ion Pepenar. "Long-term durability of reinforced and prestressed elements in aggressive environments." *ACI Materials Journal, n°91-M11*, 1994: pp 135-140;
 - Neville, A.M. *Properties of Concrete*. Fourth edition, Longman, 1995;
 - Newman, J.B. "Properties of structural lightweight aggregate concrete." In *Structural Lightweight Aggregate Concrete*, by J.L.Clarke, pp 19-44. Chapman & Hall, 1993;
 - Nyame, B.K. "Permeability of normal and lightweight mortars." *Magazine of concrete research, vol. 37, n° 130* , 1985: pp 4-8;
 - Page, C.L. "Nature and properties of concrete in relation to reinforcement corrosion." *International conference on Corrosion of steel in concrete, Aachen, 17-19 February*, 1992;

- Papadakis, Vagelis G. "Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress." *Cement Concrete research*, vol 30, 2000: pp 291-299;
- Rodhe M, X-Betong. Properties of fresh and hardened concrete, Report P86:3, Department of Building Materials, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden; 1986. pp 30;
- Roy SK, Beng PK, Northwood DO. Carbonation of concrete structures in the tropical environment of Singapore and a comparison with published data for temperate climates. *Mag Concr Res*1996;48(177) pp293–300;
- Schröder, F.; Smolczyk, H. G. Carbonation and protection against steel corrosion. In.: *International Symposium on the Chemistry of Cement*, 5th., 1968, Tokyo:1969., v.4, (Part IV). Pp 188-198;
- Short, Andrew, e William Kinniburgh. *Lightweight concrete*. Great Britain: Books Limited. John Wiley & sons, Inc. First published, 1963;
- Shulze, W., e J. Gunzler. "Corrosion protection of the reinforcement in lightweight concrete." *Proceedings of the first international congress on lightweight concrete, ICLC. Concrete Society, 27-29 May, Volume 1*. London., 1968. pp 111-122;
- Smeplass, S. "Drying of LWAC ." *Second Internat. Symp. on structural lightweight aggregate concrete, 18-22 June* . Kristiansand, Norway: Editors: S. Helland et al, 2000. pp 833-843;
- Smolczyk, H.G. *Rilem International symposium carbonation of concrete, Cement and concrete association. Fulmer Grange*, 1976;
- Swamy, R. N., e E. D. Jiang. "Pore structure and carbonation of lightweight concrete after 10 years exposure." *Structural Lightweight aggregate concrete performance, ACI SP-136* . Editors: Thomas A.Holm and Alexander M. Vaysburd, 1992. pp 377-396;
- Thienel, K. Ch., F. Schmidt Döhl, e V. Feldrappe. "In-situ tests on existing LWAC structures." *Second International Symposium on structural lightweight aggregate concrete, 18-22 June*;
- Kristiansand, Norway: Editors: S. Helland et al, 2000b. pp 912-921;
- Thiery, M., P. Dangla, G. Villain, e G. Platret. "A prediction model for concrete carbonation based on coupled CO₂-H₂O-ions transfers and chemical reactions." *10DBMC Int. Conférence on Durability of Building Materials and Components*. LYON (France), 17-20 April, 2005. 8p;
- Tuutti, K. *Corrosion of steel in concrete*. Stockolm, Sweden: Swedish cement and concrete research institute, 1982;
- Vaysburd, Alexander M. "Durability of Lightweight Concrete Bridge In Severe Environments." *Concrete International, Volume 18, Issue 7* , 1996: pp 33-38;
- Vieira, M.G. *Betões de elevado desempenho com agregados leves. Durabilidade e microestrutura*. Tese de mestrado LNEC, 2003;

- Wierig, H.J. "Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure." *RILEM Seminar Durability of concrete structures under normal outdoor exposure*;
- Hannover , 1984. pp 239-249;
- Zhang, Min-Hong, e Odd E. Gjrv. "Characteristics of lightweight aggregates for high strenght LWA concrete." *Materialutvikling Hoyfast Betong. Report N2.2. STF70 A92022.*, 1989. 41p;
- Zhang, Min-Hong, e O.E. Gjrv. "Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete ." *ACI materials journal. N88-M19*, 1991: pp 150-158;
- Zhang, Min-Hong, e Odd E.Gjrv. "Mechanical properties of high-strength lightweight concrete." *ACI Materials Journal, n88-M29*, 1991b: pp 240-247;

Normas e especificações

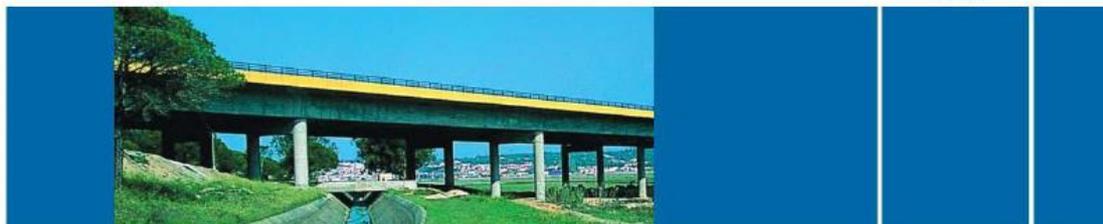
- E465. "Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pr-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS." Lisboa: Especificação LNEC, 2005.
- E391. "Betões: determinação da resistência à carbonatação." Lisboa: Especificação LNEC, 1993
- NP EN 196-1. "Métodos de ensaio de cimentos - Parte 1: Determinação das resistências mecncas." Versão Portuguesa da EN 196-1:2006, Instituto português da Qualidade.
- NP EN 196-2. " Métodos de ensaio de cimentos - Parte 2: Análise química dos cimentos." Versão portuguesa da EN 196-2:2014, Instituto português da Qualidade.
- NP EN 196-3. " Métodos de ensaio de cimentos - Parte 3: Determinação do tempo de presa e expansibilidade." Versão portuguesa da EN 196-3:2005, Instituto português da Qualidade.
- NP EN 196-6. " Métodos de ensaio de cimentos - Parte 6: Determinação de finura." Versão portuguesa da EN 196-6:2010, Instituto português da Qualidade.
- NP EN 197-1. "Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes." Versão portuguesa da EN 197-1:2000, Instituto português da Qualidade, Abril de 2001. 35p.
- NP EN 206-1. "Betão. Part 1-Especificação, performance, produção e conformidade." European Committee for standardization, CEN/TC 104-Concrete. Versão portuguesa da EN 206- 1:2000+A1:2004, Instituto português da Qualidade, Maio de 2008.
- NP EN 451-1. "Métodos de ensaio de cinzas volantes - Parte 1: Determinação do teor de óxido de cálcio livre." Versão portuguesa da EN 451-1:2006, Instituto português da Qualidade.

- NP EN 933-1. “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração.” Versão portuguesa da EN 933-1:1997, Instituto português da Qualidade, 2000.
- NP EN 933-4. “Ensaio para determinação das propriedades geométricas dos agregados – Parte 2: Determinação da forma das partículas. Índice de forma.” Versão portuguesa da EN 933- 4:1997, Instituto português da Qualidade, 2002.
- NP EN 1097-3. “Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 2: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios.” Versão portuguesa da EN 1097-3:1998, Instituto português da Qualidade, 2000.
- NP EN 1097-6. “Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.” Versão portuguesa da EN 1097-6:1999, Instituto português da Qualidade, 2002.
- NP EN 12350-2. “Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento.” Versão portuguesa da EN 12350-2:1999, Instituto português da Qualidade, 2002.
- NP EN 12350-6. “Ensaio do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica.” Versão portuguesa da EN 12350-6:1999, Instituto português da Qualidade, 2002 89.
- NP EN 12390-2. “Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica.” Versão portuguesa da EN 12390-2:2003, Instituto português da Qualidade, 2000.
- NP EN 12390-3. “Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio .” Versão portuguesa da EN 12390-3:2003, Instituto português da Qualidade, 2001.
- NP EN 12390-7. “ Ensaio do betão endurecido. Parte 7: Massa volúmica do betão endurecido.” Versão portuguesa da EN 12390-7:2003, Inst. Português da Qualidade, 2000.
- NP EN 12620. “Agregados para betão.” Versão portuguesa da EN 12620:2002, Instituto português da Qualidade, Abril de 2004. 56p.

Anexos

Anexo I – Ficha técnica – Cimento Portland

CEM I 42,5R
Cimento Portland



Certificação

Cimento certificado segundo a NP EN 197-1.
Certificados de Conformidade 0856-CPD-0118 e 0856-CPD-0124.

Locais de Produção

Fábrica Secil-Outão
Fábrica Maceira-Liz

Embalagem

Granel
Sacos de 40kg

Composição do Produto (Núcleo Cimento)

95% a 100% Clínquer Portland
0% a 5% Outros Constituintes

Principais Aplicações

O Cimento Portland CEM I 42,5R é um produto de elevada qualidade e performance muito utilizado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada a muito elevada resistência. É também particularmente adaptado aos trabalhos onde se exige uma resistência muito elevada aos primeiros dias após aplicação.

As principais aplicações deste cimento são:

- betão pronto ou fabricado em obra de elevada e muito elevada resistência inicial ou final;
- betões leves de elevada resistência;
- betão com aplicação de pré-esforço a idades jovens;
- betão aplicado em tempo frio;
- prefabricação ligeira preesforçada e pesada com alta rotatividade de moldes e pistas;
- caldas de selagem e injeção.

Principais Características

Cimento de cor cinzenta, com elevado calor de hidratação.

Desenvolvimento rápido de resistências (resistência inicial elevada).

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

Advertências Específicas

O correcto desenvolvimento de resistências é muito sensível ao processo de cura.

- devem tomar-se cuidados para evitar a dissecação de todas as peças betonadas;
- devem evitar-se betonagens em tempo muito quente.

Este cimento permite a fabricação de betões de elevado desempenho mecânico, recomendando-se o estudo prévio de composições para obter a melhor performance.

A utilização deste cimento é compatível com a introdução de adições de hidraulicidade latente e é usual a utilização de adjuvantes para melhoria da trabalhabilidade com eventual redução da relação água/cimento.

Informação de Segurança

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.

Última actualização

Setembro 2004 - Versão 3

pag. 1 | 2

Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
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
2 dias	7 dias	
≥20	-	28 dias
		≥ 42,5 e ≤ 62,5

Características Físicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m³ de cimento CEM I 42,5R



Autoestrada A2.
Ponte de Alcácer do Sal.



Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.

Direcção 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

Anexo II – Ficha técnica – Superplastificante



The Chemical Company

GLENIUM[®] SKY 548

Superplastificante de éter policarboxílico para produção de betão de elevada performance com especial relevância sobre as resistências iniciais

Descrição

GLENIUM SKY 548 é um superplastificante inovador de última geração, à base de polímeros de éter policarboxílico (PCE). A configuração especial das suas moléculas permite uma eficaz hidratação do cimento. A adsorção da molécula às partículas de cimento, combinada com um eficaz efeito de dispersão, expõe uma maior superfície dos grânulos de cimento para reagirem com a água. Como resultado deste efeito, é possível obter um processo de hidratação mais eficaz e consequentemente melhor comportamento nas resistências iniciais.

A estrutura do polímero do GLENIUM SKY 548 foi especialmente desenvolvida para melhorar a reologia do betão para aplicações em pré ou pós-esforço, revestimento definitivo de túneis, ou em qualquer processo que se pretenda uma descofragem relativamente rápida, obtendo betões de elevada fluidez e baixa viscosidade mesmo a baixas relações a/c sem risco de pegajosidade. Robustez é o distinto benefício do betão produzido com GLENIUM SKY 548. GLENIUM SKY 548 é livre de cloretos, reúne os requisitos NP EN-934-2 e é compatível com todos os tipos de cimento.

Rendimento / Dosagem

A dosagem normalmente recomendada situa-se entre 0,5 e 1,5 litros por 100 Kg de ligante e outros materiais (finos ou fillers) inferiores a 0,125 mm utilizados para produção de betão rheodinâmico. Outras dosagens podem ser utilizadas em situações especiais de acordo com as condições específicas de cada obra. Nestes casos consultar o nosso Departamento Técnico.

Embalagem e armazenamento

GLENIUM SKY 548 é fornecido em bidons de 210L, depósitos de 1000L e a granel. Armazenar em local a temperaturas não inferiores a 5°C. Se congelar, o produto deverá ser aquecido até pelo menos 30°C, e misturado adequadamente.

Campos de aplicação

GLENIUM SKY 548 pode ser utilizado em combinação com adjuvantes RHEOMIX 820 MA ou RHEOMATRIX, produzindo betão rheodinâmico, auto-compactável, mesmo na presença de grande densidade de armaduras, sem necessidade de vibração. GLENIUM SKY 548 permite obter uma forte plastificação e um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas.

A utilização do GLENIUM SKY 548 deverá ter em particular atenção a temperatura ambiente. É aconselhável a utilização de um produto de gama POZZOLITH em sinergia por forma a garantir o tempo de trabalhabilidade desejado, sem comprometer a sua principal característica para contribuição melhorada às idades iniciais.

Vantagens

GLENIUM SKY 548 proporciona os seguintes benefícios à indústria de produção de betão:

- Produção de betão rheoplástico e rheodinâmico com uma menor relação a/c.
- Optimização dos ciclos de obra reduzindo a sua duração.
- Aumento da produtividade.
- Melhoria da aparência superficial.
- Melhora a reologia do betão, minimizando a sua pegajosidade.
- Assegura robustez e consistência na qualidade do betão produzido.
- Comparativamente aos superplastificantes tradicionais, as propriedades tais como resistências iniciais e finais, à flexão e compressão, aderência ao aço, módulo de elasticidade, retracção, segregação e impermeabilidade são melhoradas.

GLENIUM[®] SKY 548

Características técnicas	
Função principal:	Superplastificante / Redutor de água de alta actividade
Função secundária:	Acelerador de endurecimento
Efeitos secundários:	Risco de segregação com sobredosagem
Marcação CE:	Segundo NP EN 934-2 como T3.1, T3.2 e T7
Aspecto:	Líquido turvo ligeiramente amarelado
Densidade relativa (20°C):	1.038 ± 0,02 g/cm ³
pH:	6 ± 1
Viscosidade Brookfield (20°C):	< 70 cps
Teor em iões cloreto:	< 0,1%
<i>Os dados técnicos aqui apresentados são fruto de resultados estatísticos. Caso se pretendam valores de controlo, podem ser solicitados ao nosso Departamento Técnico.</i>	

Modo de aplicação

- GLENIUM SKY 548 é um adjuvante líquido pronto a usar que deve ser adicionado ao betão durante a mistura. Os melhores resultados são obtidos quando o adjuvante é adicionado após todos os restantes componentes e após a adição de pelo menos 80% do total de água de mistura. Evitar a adição do adjuvante aos materiais secos
- Misturar durante pelo menos 60 segundos, depois da introdução do GLENIUM SKY 548 por forma a obter uma dispersão homogénea.
- Continuar a mistura e ajustar a quantidade de água para obter a trabalhabilidade requerida.

NOTA:

A presente Ficha Técnica serve, assim como as demais recomendações e informação técnica, unicamente para a descrição das características do produto, modo de utilização e suas aplicações. Os dados e informações reproduzidos têm por base os nossos conhecimentos técnicos adquiridos através de biografia, ensaios de laboratório e através da prática.

Os dados de consumo e dosificação que figuram nesta ficha técnica, são baseados na nossa própria experiência, pelo que são susceptíveis de variações devido a diferentes condições de obra. Os consumos e dosificações reais deverão determinar-se através de ensaios prévios sendo estes responsabilidade do cliente.

Para um acompanhamento adicional, o nosso serviço técnico, está à sua disposição.

BASF Portuguesa, S.A. reserva o direito de modificar a composição dos produtos, sempre e quando estes continuem cumprindo as características descritas na Ficha Técnica.

Outras aplicações do produto que não se enquadrem com as indicadas, não serão da nossa responsabilidade.

Outorgamos garantia em caso de defeito na qualidade de produção dos nossos produtos, ficando excluídas as reclamações adicionais, sendo da nossa responsabilidade tão só a de compensar o valor de mercadoria fornecida.

Deve ser tido em conta as eventuais reservas correspondentes a patentes ou direito de terceiros.

Data de emissão 16/06/2011

A presente ficha técnica perde a sua validade com a emissão de uma nova.

Compatibilidade

GLENIUM SKY 548 é compatível e recomendado para utilização com:

- RHEOMATRIX para produção de Smart Dynamic Concrete;
- RHEOMIX 820 MA, adjuvantes para produção de betão rheodinâmico;
- MICRO-AIR adjuvante introdutor de ar, para melhorar a resistência aos ciclos de gelo-degelo (classe de exposição XF 1 a XF 4, EN 206 – 1);
- MEYCO MS 610, microsilica para betão de maiores performances e de maior durabilidade em ambientes quimicamente agressivos (classe de exposição XA 1 a XA 3, EN 206 – 1);
- Agente desmoldante RHEOFINISH para remoção de cofragens e para melhorar acabamentos arquitectónicos.

GLENIUM SKY 548 não é compatível com os superplastificantes RHEOBUILD.



Glenium Sky 548 Página 2 de 2

BASF Portuguesa, S.A.

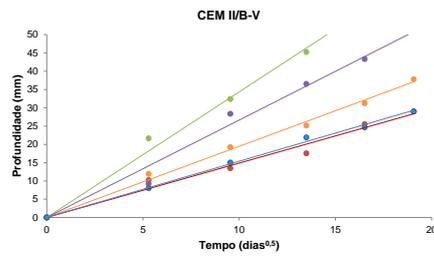
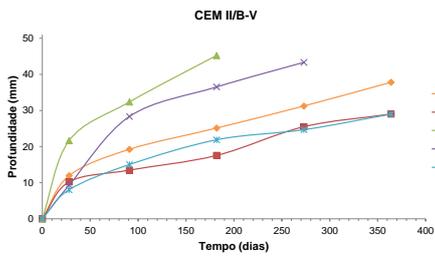
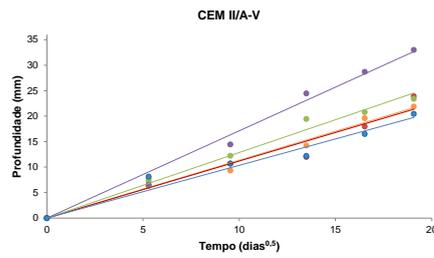
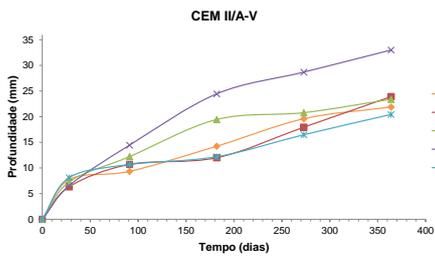
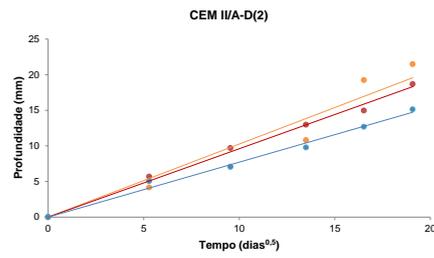
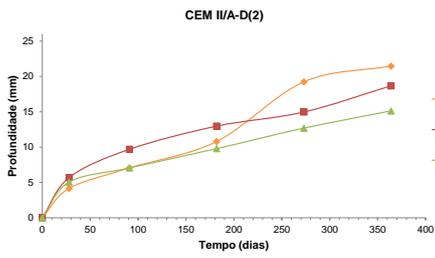
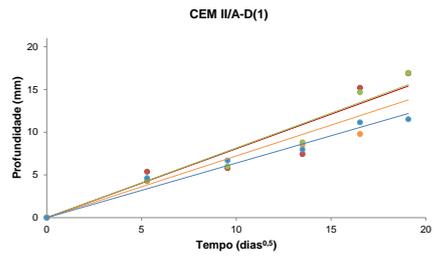
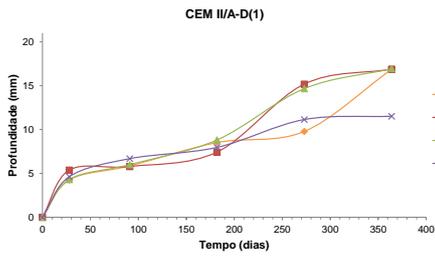
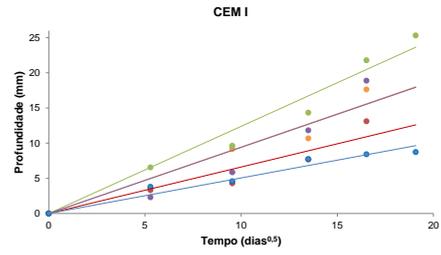
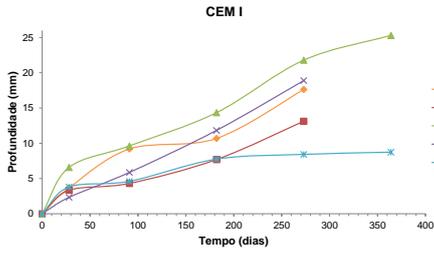
Sede: Rua 25 de Abril, n.º 1
2689-538 PRIOR-VELHO
Tel: 21 949 99 00 – Fax: 21 949 99 45/49

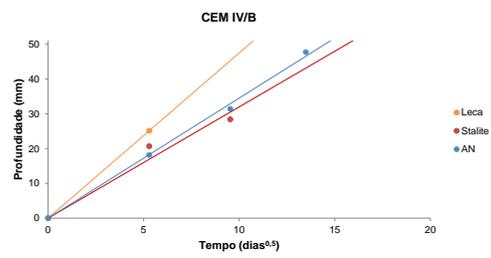
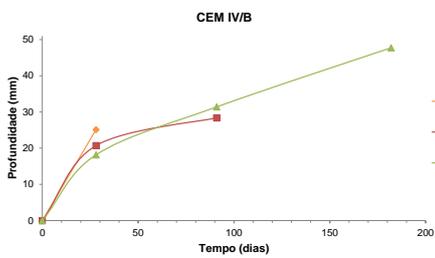
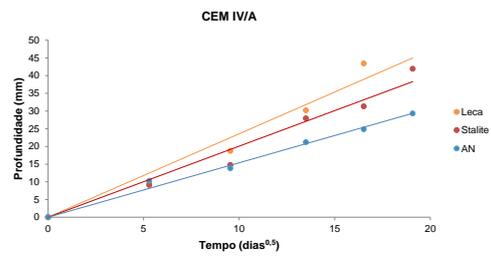
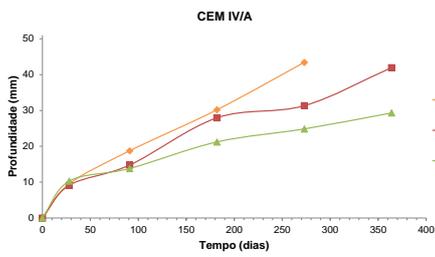
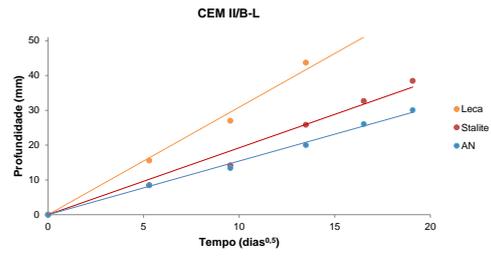
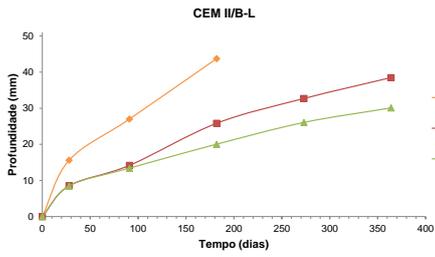
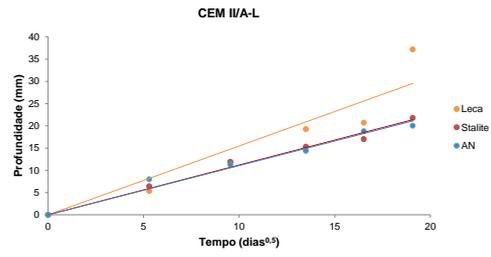
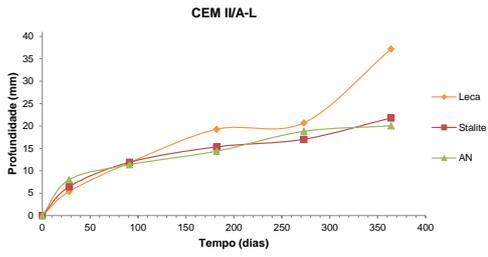
Fábrica: Rua de S. Sebastião, 57 – Cabra Figa
2635-047 RIO DE MOURO
Tel: 21 915 85 50 – Fax: 21 915 85 52

Delegação Norte: Rua Manuel Pinto de Azevedo, 626
4100-320 PORTO
Tel: 22 615 96 00 – Fax: 22 617 75 10

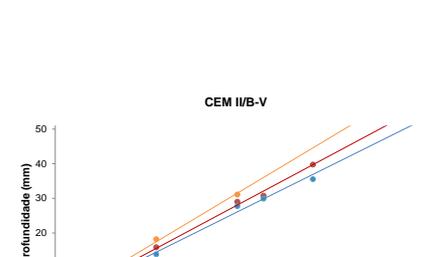
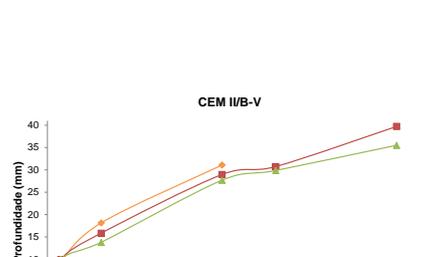
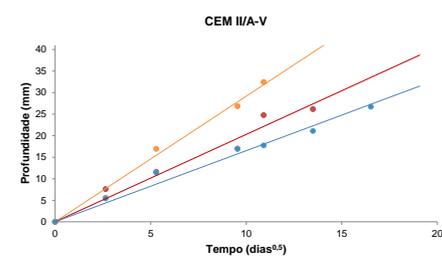
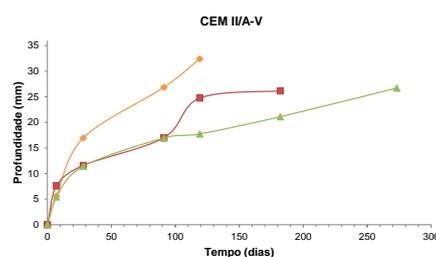
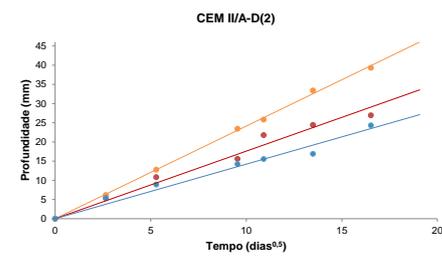
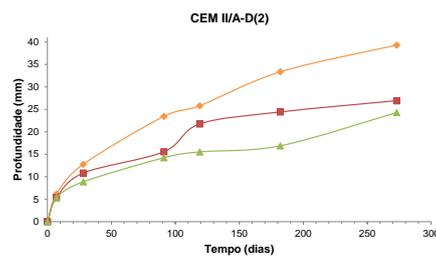
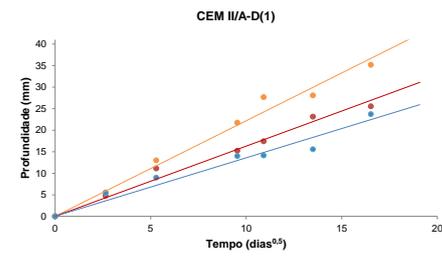
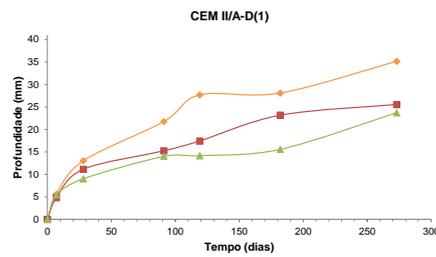
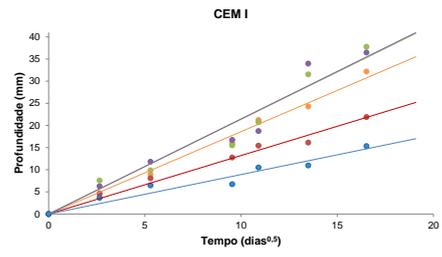
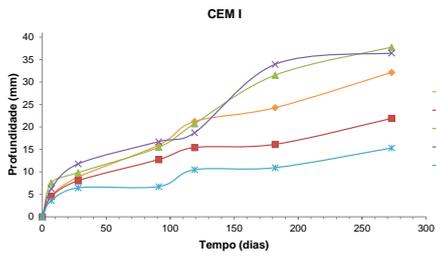
www.basf.pt

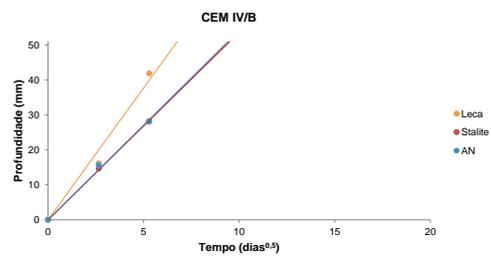
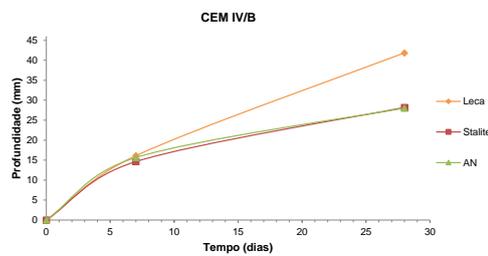
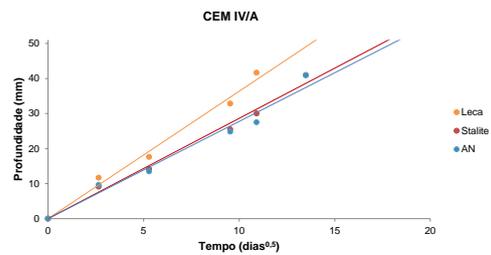
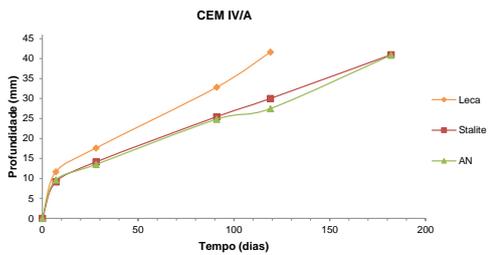
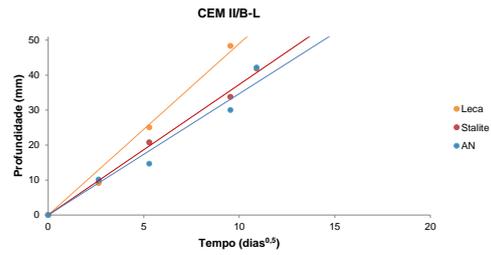
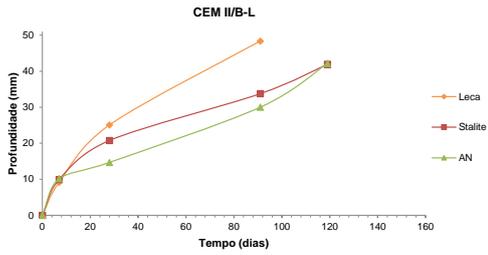
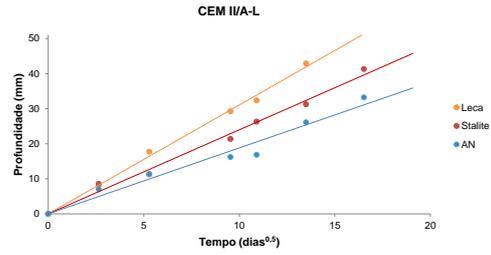
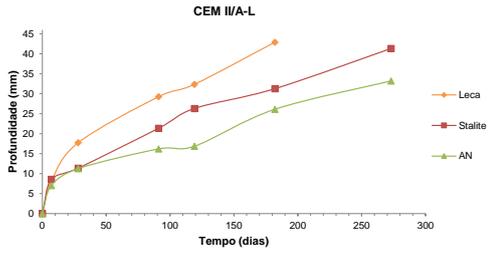
Anexo III – Curvas de Carbonatação (a/l=0,45)





Anexo IV – Curvas de Carbonatação (a/l=0,55)





Anexo V – Curvas de Carbonatação ($a/l=0,65$)

