



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura

Durabilidade do betão: Método de avaliação da carbonatação em condições gelo-degelo

Joana Filipa Lopes dos Reis

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor João Paulo de Castro Gomes
Co-orientador: Prof. Doutor Paulo Sérgio Duque de Brito

Covilhã, Outubro de 2014

Agradecimentos

Ao Professor Doutor João Paulo de Castro Gomes, orientador científico deste trabalho, agradeço por toda a disponibilidade e dedicação prestada ao longo do desenvolvimento deste estudo.

À Mestre Ana Paula Gomes do Centro de Ótica da Universidade da Beira Interior, agradeço pela ajuda na determinação da composição química elementar e de óxidos das amostras de betão.

Ao Sr. Jorge Miguel dos Santos Bento, Técnico do Laboratório de Durabilidade da Universidade da Beira Interior, agradeço por toda a ajuda prestada no desenvolvimento do dispositivo de ensaio de carbonatação acelerada e na realização dos restantes ensaios laboratoriais.

Ao Luís Borges, pela ajuda na criação e desenvolvimento do *software* pertencente ao dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação.

A todos os colegas de curso que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

À minha família e amigos, pelo encorajamento, apoio e ajuda.

Ao Mário, pela paciência, carinho e apoio incondicional.

À minha mãe, um enorme obrigada por tornar todo este percurso académico possível, pelas palavras de conforto e todo o apoio.

Resumo

A interação entre as estruturas de betão armado e a agressividade do meio ambiente, quando ocorrem diferentes ações em simultâneo, proporciona a degradação precoce das mesmas. Desta forma, a sua durabilidade é colocada em causa e o tempo de vida útil para o qual foram projetadas é reduzido. De entre os vários mecanismos de deterioração do betão foram objeto de estudo deste trabalho a carbonatação e os ciclos gelo-degelo. A ação isolada ou conjunta destes mecanismos provoca danos irreversíveis nas estruturas de betão, com consequências graves na sua estabilidade e segurança.

No sentido de avaliar o comportamento do betão face à carbonatação e ciclos gelo-degelo desenvolveu-se um dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação onde corpos de prova cilíndricos com condições de cura distintas, em laboratório e sob condições naturais de exposição, são submetidos a concentrações elevadas de CO₂ e diferentes humidades relativas. Os ensaios de carbonatação acelerada incidiram sob corpos de prova padrão e corpos de prova degradados pela ação de sucessivos ciclos gelo-degelo. No ensaio de corpos de prova padrão utilizaram-se concentrações de 15, 30 e 60 % de CO₂ e variou-se a humidade relativa entre 32, 60, 75 e 90 %. Os corpos de prova degradados pela ação de 8, 12, 16 e 20 ciclos gelo-degelo foram submetidos ao ensaio acelerado de carbonatação sob 60 % de CO₂ e 75 % de HR. Foram ainda efetuados ensaios complementares de caracterização de um betão padrão no que diz respeito à sua durabilidade, através de ensaios de absorção por capilaridade e resistência à compressão, microestrutura e composição química através dos ensaios de espectroscopia de energia dispersiva e porosimetria por intrusão de mercúrio, respetivamente. Estes últimos foram realizados antes e após carbonatação.

Constatou-se que o maior avanço da frente de carbonatação, medida com fenolftaleína, é conseguido sob condições de exposição de 60 % de CO₂ e 75 % de HR. O incremento do número de ciclos gelo-degelo proporciona uma maior degradação nos corpos de prova, conduzindo a profundidades carbonatadas críticas. Com 16 e 20 ciclos gelo-degelo a profundidade carbonatada obtida em corpos de prova curados em laboratório é cerca do dobro da verificada em corpos de prova padrão. Para o mesmo número de ciclos, os corpos de prova curados em condições naturais carbonatam a 100 %.

Desta forma, é possível afirmar que o dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação desenvolvido permite avaliar com precisão os efeitos da carbonatação e gelo-degelo no betão.

Palavras-chave

Durabilidade, carbonatação, ciclos gelo-degelo, ensaio acelerado de carbonatação

Abstract

The interaction between the reinforced concrete structures and the aggressiveness of the environment, when different actions occur simultaneously, provides their early degradation. Thus, their durability is put in jeopardy and the operating time for which they were designed is reduced. Between the several mechanisms of concrete deterioration, carbonation and freeze-thaw cycles were object of study of this work. The isolated or joint action of these mechanisms causes irreversible damages in the concrete structures, with serious consequences on their stability and safety.

To assess the behavior of the concrete in relation to carbonation and freeze-thaw cycles, an accelerated carbonation test device was developed where cylindrical test samples with different maturing conditions, in lab and under natural exposition conditions, are submitted to high concentrations of CO₂ and different relative humidity. The accelerated carbonation tests were focused on standard test samples deteriorated by the action of successive freeze-thaw cycles. In the standard test samples have been used concentrations of 15, 30 and 60% of CO₂ and the relative humidity had a variation between 32, 60, 75 and 90%. The test samples deteriorated by the action of 8, 12, 16 and 20 freeze-thaw cycles were submitted to the accelerated carbonation test under 60% of CO₂ and 75% of RH. Standard concrete characterization complementary tests were also performed in relation to its durability through capillary and compressive strength absorption tests, microstructure and chemical composition through dispersive energy spectroscopy tests and mercury intrusion porosimetry, respectively. The latter were performed before and after carbonation.

It was found that the greatest advance of the carbonation front measured with phenolphthalein is achieved under exposition conditions of 60% of CO₂ and 75% of RH. The increase of the number of freeze-thaw cycles provides a higher degradation on the test samples, leading to critical carbonated depths. With 16 and 20 freeze-thaw cycles, the carbonated depth obtained on test samples matured in lab is around twice the carbonated depth tested on standard test samples. For the same number of cycles, the sample tests matured in natural conditions carbonate at 100%.

Thus, it is possible to affirm that the accelerated carbonation test device developed make it possible to access the effects of carbonation and freeze-thaw in concrete with precision.

Keywords

Durability, carbonation, freeze-thaw cycles, accelerated carbonation test

Índice

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 - ENQUADRAMENTO DO TEMA DA DISSERTAÇÃO	1
1.2 - OBJETIVOS DO TRABALHO	3
1.3 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
CAPÍTULO 2 – EFEITOS DA CARBONATAÇÃO NO BETÃO	5
2.1 - ENQUADRAMENTO	5
2.2 - SÍNTESE DO PROCESSO DE FABRICO E HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....	6
2.3 - MECANISMO DE OCORRÊNCIA DA CARBONATAÇÃO.....	10
2.4 - FATORES QUE INFLUENCIAM A VELOCIDADE DE CARBONATAÇÃO	13
2.4.1 - Fatores ambientais	14
2.4.1.1 - Concentração de CO ₂	14
2.4.1.2 – Humidade relativa.....	16
2.4.1.3 – Temperatura	18
2.4.1.4 – Ocorrência de chuvas.....	19
2.4.2 – Características do betão.....	19
2.4.2.1 – Tipo e quantidade do cimento	20
2.4.2.2 – Grau de hidratação	21
2.4.2.3 – Relação água/cimento	22
2.4.2.4 – Condições de cura.....	23
2.4.2.5 – Fissuras	25
2.5 – CÁLCULO DA VELOCIDADE DE PENETRAÇÃO DO CO ₂ NO BETÃO	25
2.6 – MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	26
2.7 – INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO NAS ARMADURAS	28
2.8 – ENSAIOS DE CARBONATAÇÃO	30
2.8.1 – Ensaio ao natural	31
2.8.2 – Ensaio acelerados	31
2.9 – CARBONATAÇÃO DO BETÃO EM CONDIÇÕES GELO-DEGELÓ.....	32
2.9.1 – Ciclos gelo-degelo	33
2.9.2 – Ação da carbonatação e ciclos gelo-degelo: casos de estudo	34
CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE ENSAIO ACELERADO DE CARBONATAÇÃO .	37
3.1 – ENQUADRAMENTO	37
3.2 – PRINCIPAIS CONSTITUINTES DO DISPOSITIVO.....	37
3.2.1 – Caixa estanque	38
3.2.2 – Botija de CO ₂	38
3.2.3 – KIT de fluxo de CO ₂	39

3.2.4 – Software	39
3.2.5 – Electroválvula	40
3.2.6 – Sistema Arduíno	40
3.3 – MONTAGEM DO DISPOSITIVO	41
3.4 – CRIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE HUMIDADE RELATIVA	42
3.5 – FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO	43
3.6 – TESTES DE FUNCIONAMENTO	45
3.6.1 – Software inicial	46
3.6.2 – Software final	47
CAPÍTULO 4 – PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
4.1 – ASPETOS GERAIS	49
4.2 – ESPECIFICAÇÕES DO BETÃO	49
4.3 – EXECUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	50
4.4 – PRÉ-CONDICIONAMENTO	51
4.5 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO	52
4.5.1 – Absorção de água por capilaridade	52
4.5.1.1 – Sem pré-condicionamento	52
4.5.1.2 – Com pré-condicionamento	54
4.5.2 – Resistência à compressão	54
4.5.3 – Porosimetria por intrusão de mercúrio	55
4.5.4 – Composição química	57
4.6 – ENSAIO ACELERADO DE CARBONATAÇÃO	58
4.6.1 – Enquadramento teórico	58
4.6.2 – Pré-condicionamento	58
4.6.3 – Procedimento de ensaio	60
4.6.3.1 – Ensaio Preliminares	63
4.6.3.2 – Ensaio em corpos de prova padrão	64
4.6.3.3 – Ensaio em corpos de prova sujeitos a ciclos de gelo-degelo	65
CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	67
5.1 – ASPETOS GERAIS	67
5.2 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO	67
5.2.1 - Absorção de água por capilaridade	67
5.2.1.1 – Coeficientes de capilaridade e absorção: corpos de prova secos	68
5.2.1.2 – Coeficientes de capilaridade e absorção: corpos de prova pré-condicionados	70
5.2.1.3 – Absorção capilar: corpos de prova curados em condições naturais	71
5.2.1.4 – Absorção capilar: corpos de prova curados em laboratório	72
5.2.2 – Resistência à compressão	74
5.2.3 – Porosimetria por intrusão de mercúrio	75

5.2.4 – Composição química	80
5.3 – ENSAIO ACELERADO DE CARBONATAÇÃO	84
5.3.1 - Ensaio em corpos de prova padrão	84
5.3.2 - Ensaio em corpos de prova sujeitos a ciclos de gelo-degelo	86
5.3.3. Aplicação da 1ª Lei da Difusão de Fick	87
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	91
6.1 - CONCLUSÕES.....	91
6.2 – RECOMENDAÇÕES FUTURAS.....	93
BIBLIOGRAFIA	95
ANEXO A - PEÇAS DESENHADAS	
ANEXO B – TABELAS EXCEL	

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Esquema representativo do fabrico do cimento Portland	7
Figura 2.2 - Esquema das transformações ocorridas na matéria-prima até ao clínquer	8
Figura 2.3 - Contributo dos componentes puros do cimento Portland e evolução da resistência à compressão em função do tempo	9
Figura 2.4 - Desenvolvimento dos produtos da hidratação do cimento no tempo	9
Figura 2.5 - Avanço do processo de carbonatação	12
Figura 2.6 - Zonas envolvidas no mecanismo de carbonatação e variação do pH ao longo da profundidade	13
Figura 2.7 - Influência da concentração de CO ₂ no coeficiente de carbonatação.....	15
Figura 2.8 - Poros totalmente secos: não ocorre carbonatação	16
Figura 2.9 - Poros saturados: avanço da frente de carbonatação no betão é mínima.....	16
Figura 2.10 - Poros parcialmente preenchidos com água: avanço da frente de carbonatação é inevitável	17
Figura 2.11 - Relação entre o grau de carbonatação e a humidade relativa do ar	18
Figura 2.12 - Efeito das condições de exposição na carbonatação	19
Figura 2.13 - Influência do tipo de cimento e da sua quantidade, por m ³ de betão, sobre a profundidade de carbonatação	21
Figura 2.14 - Variação da profundidade de carbonatação em função da relação água/cimento	22
Figura 2.15 - Profundidade de carbonatação (d) em função do tempo de exposição (d), influenciado pelo regime de cura.....	23
Figura 2.16 - Profundidade de carbonatação, após 365 dias em prismas pequenos, em função do tipo de cura e do teor de cimento.....	24
Figura 2.17 - Influência da cura na profundidade de carbonatação	24
Figura 2.18 - Representação esquemática da carbonatação no interior de uma fissura.....	25
Figura 2.19 - Gradiente de pH na frente de carbonatação	27
Figura 2.20 - Indicador de fenolftaleína para medição da carbonatação	28
Figura 2.21 - Modelo de vida útil de Tuutti	29
Figura 2.22 - Modelo simplificado da corrosão do aço no betão	30
Figura 3.1 - Caixa estanque	38
Figura 3.2 - Tampa da caixa estanque	38
Figura 3.3 - Botija e manómetro regulador de fluxo de CO ₂	38
Figura 3.4 - KIT de fluxo de CO ₂	39
Figura 3.5 - <i>Software</i>	40
Figura 3.6 - Electroválvula.....	40
Figura 3.7 - Sistema Arduíno	41
Figura 3.8 - Dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação	43
Figura 3.9 - Esquema do dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação	44
Figura 3.10 - Interface do <i>software</i> inicial.....	46
Figura 3.11 - Variação da concentração de CO ₂ ao longo de 3 horas (<i>software</i> inicial).....	47
Figura 3.12 - Interface da versão final do <i>software</i>	47

Figura 3.13 - Variação da concentração de CO ₂ ao longo de 3 horas (software final)	48
Figura 4.1 - Extração das carotes	50
Figura 4.2 - Corpos de prova no interior da estufa ventilada	53
Figura 4.3 - Ensaio de absorção de água por capilaridade	53
Figura 4.4 - Prensa utilizada para determinar a resistência à compressão	55
Figura 4.5 - Microporosímetro de mercúrio	55
Figura 4.6 - (a) Extração de fragmentos dos corpos de prova, (b) Amostra para porosimetria por intrusão de mercúrio	57
Figura 4.7 - Ambientes de pré-condicionamento	59
Figura 4.8 - Rotura do corpo de prova	60
Figura 4.9 - Detalhe do corpo de prova após a aspersão de fenolftaleína	61
Figura 4.10 - Frente de carbonatação (1) paralelamente à superfície, (2) e (3) com zonas de irregularidade	62
Figura 4.11 - Contorno do corpo de prova e da região carbonatada	62
Figura 4.12 - Linhas auxiliares de medição da profundidade de carbonatação numa das faces do corpo de prova	63
Figura 5.1 - Média e desvio padrão do coeficiente de capilaridade	69
Figura 5.2 - Média e desvio padrão do coeficiente de absorção	69
Figura 5.3 - Comparação da absorção capilar em corpos de prova com e sem pré-condicionamento, curados em condições naturais	72
Figura 5.4 - Comparação da absorção capilar em corpos de prova com e sem pré-condicionamento, curados em laboratório	74
Figura 5.5 - Volume de mercúrio intrudido acumulado em função do diâmetro dos poros	76
Figura 5.6 - Diferença da intrusão cumulativa de mercúrio	77
Figura 5.7 - Curvas de porosimetria de cada amostra	78
Figura 5.8 - Distribuição de tamanho de poros por faixas de diâmetros	78
Figura 5.9 - Distribuição do tamanho de poros	79
Figura 5.10 - Distribuição de poros por volume de mercúrio intrudido	79
Figura 5.11 - Composição química elementar em cada amostra	80
Figura 5.12 - Composição química de óxidos em cada amostra	81
Figura 5.13 - Análise química da amostra não carbonatada curada em laboratório	82
Figura 5.14 - Análise química da amostra carbonatada curada em laboratório	82
Figura 5.15 - Análise química da amostra não carbonatada curada em condições naturais	83
Figura 5.16 - Análise química da amostra carbonatada curada em condições naturais	83
Figura 5.17 - Penetração de CO ₂ nos corpos de prova em função do número de ciclos gelo-degelo	87

Lista de Quadros

Quadro 2.1 - Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação	14
Quadro 2.2 - Classificação da agressividade do ambiente	16
Quadro 2.3 - Propriedades dos principais indicadores químicos usados para observação visual da região carbonatada	27
Quadro 3.1 - Humidade relativa produzida através de solução aquosa saturada	42
Quadro 4.1 - Fotografia e caracterização da carote	50
Quadro 4.2 - Ambientes criados através de soluções salinas	59
Quadro 4.3 - Massa dos corpos de prova antes e após pré-condicionamento.....	60
Quadro 4.4 - Condições de exposição para ensaio acelerado de carbonatação	64
Quadro 4.5 - Condições de exposição impostas aos corpos de prova pré-condicionados com 75 % de HR para ensaio acelerado de carbonatação.....	65
Quadro 4.6 - Condições de exposição impostas aos corpos de prova degradados pela ação de ciclos gelo-degelo no ensaio acelerado de carbonatação	66
Quadro 5.1- Coeficientes de absorção e capilaridade dos corpos de prova secos	68
Quadro 5.2 - Classificação dos materiais com base nos coeficientes de absorção.....	69
Quadro 5.3 - Classificação dos betões com base nos coeficientes de capilaridade.....	70
Quadro 5.4 - Coeficientes de absorção e capilaridade dos corpos de prova pré-condicionados	70
Quadro 5.5 - Resultados da medição das massas dos corpos de prova secos curados ao natural	71
Quadro 5.6 - Absorção capilar dos corpos de prova secos curados ao natural	71
Quadro 5.7 - Resultados da medição das massas do corpo de prova pré-condicionado curado ao natural	71
Quadro 5.8 - Absorção capilar do corpo de prova pré-condicionado curado ao natural	72
Quadro 5.9 - Resultados da medição das massas dos corpos de prova secos curados em laboratório	73
Quadro 5.10 - Absorção capilar dos corpos de prova secos curados em laboratório	73
Quadro 5.11 - Resultados da medição das massas do corpo de prova pré-condicionado curado em laboratório.....	73
Quadro 5.12 - Absorção capilar do corpo de prova pré-condicionado curado em laboratório	73
Quadro 5.13 - Resultados do ensaio de resistência à compressão	75
Quadro 5.14 - Percentagem dos principais elementos e rácio Ca/Si	81
Quadro 5.15 - Média da profundidade carbonatada em corpos de prova sujeitos a 60 % CO ₂ e humidades relativas distintas.....	84
Quadro 5.16 - Média da profundidade carbonatada em corpos de prova pré-condicionados a 75 % de HR e sujeitos a concentrações de CO ₂ distintas	85
Quadro 5.17 - Média da profundidade carbonatada em corpos de prova sujeitos a sucessivos ciclos gelo-degelo	86
Quadro 5.18 - Composição do betão C30/37	88
Quadro 5.19 - Características da Mistura 3 N-55-42	88

Lista de Acrónimos

CEN	European Committee for Standardization
DTA	Análise Térmica Diferencial
EDX	Espectrometria de Raio-X por Dispersão de Energia
FTIR	Espectroscopia de Infravermelhos por Transformada de Fourier
HR	Humidade Relativa
TGA	Análise Termogravimétrica
UBI	Universidade da Beira Interior

Simbologia

Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
Ca	Cálcio
Ca ²⁺	lão cálcio
C ₃ A	Matéria vítrea
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
C ₄ AF	Celite
CaHCO ₃	Bicarbonato de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
CaO.Fe ₂ O ₃	Ferrato de cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₃ ²⁻	lão carbonato
C ₂ S	Belite
C ₃ S	Alite
CSH	Silicato de cálcio hidratado
Fe	Ferro
Fe ²⁺	lão carbonato
FeO	Óxido de ferro
Fe(OH) ₂	Hidróxido de ferro
Fe(OH) ₃	Hidróxido férrico
H ₂ CO ₃	Ácido carbónico
H ₂ O	Água
H ₂ S	Ácido sulfídrico
K	Potássio
K ₂ CO ₃	Carbonato de potássio
K ₂ O	Óxido de potássio
KOH	Hidróxido de potássio
M	Magnésio
MgO	Óxido de magnésio
Na	Sódio
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sódio
Na ₂ O	Óxido de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
O	Oxigénio
OH ⁻	lão hidróxido
S	Enxofre

Si	Silício
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₂	Dióxido de enxofre
SO ₃	Óxido sulfúrico
TiO ₂	Dióxido de titânio

Capítulo 1 - Introdução

1.1 - Enquadramento do tema da dissertação

Atualmente, o betão armado é dos materiais mais consumidos pela Humanidade. As suas qualidades intrínsecas, aliadas ao baixo custo e desempenho eficaz, tornaram-no um material com vantagens técnicas, económicas e sociais difíceis de serem superadas por qualquer outro.

A utilização do betão iniciou-se no século XIX, no entanto o interesse pelo estudo da sua tecnologia somente surgiu na segunda metade do século XX quando este material associado ao aço proporcionou uma revolução das técnicas construtivas. A união dos dois materiais num material compósito deram origem ao tão usado betão armado, conferindo-lhe as suas melhores qualidades: resistência à tração, proveniente do aço, e uma boa resistência à compressão, proveniente do betão. Estas duas características garantiram a difusão universal do uso do betão armado, transformando-o em líder para uso nas construções em geral [1].

Com o decorrer dos anos as estruturas de betão armado, consideradas até então com uma vida útil infinita, começaram a manifestar patologias relacionadas com a sua deterioração precoce. Foi então que se sentiu necessidade em prestar uma maior atenção e importância à durabilidade das edificações, questão que até então era pouco enfatizada no sector da construção civil. As primeiras definições que surgiram para durabilidade do betão eram de tal forma simplistas que o conceito de durabilidade era inevitavelmente confundido com vida útil [2].

Após estudos aprofundados sobre o tema definiu-se durabilidade como a capacidade de uma estrutura, durante um tempo específico ou um período de vida útil, se manter em serviço e segurança num determinado meio, mesmo sendo este desfavorável ao betão. A durabilidade do betão depende de fatores como a sua qualidade e interação com o meio envolvente [3]. A vida útil de projeto é o período durante o qual os agentes agressivos penetram a rede de poros do betão sem causar danos efetivos à estrutura. Para estruturas convencionais de betão armado o período de vida útil é cerca de 50 anos, para pontes o período pode alongar-se até aos 100 anos e no caso de barragens chegar aos 200 anos [4].

Existe um vasto leque de fatores associados ao aparecimento de patologias em estruturas de betão armado. As falhas humanas levadas a cabo ao longo da vida útil da estrutura (no que toca a etapas de conceção e elaboração de projeto, execução, uso e manutenção), a concentração de alcalis presente no cimento e as severas condições de exposição onde a estrutura se insere são fatores condicionantes no que diz respeito ao desempenho, durabilidade e vida útil de uma estrutura [5]. Em determinadas situações as estruturas podem apresentar-se de tal forma deterioradas que a sua capacidade resistente é colocada em causa, promovendo o colapso total

ou parcial da mesma. Nestes casos, os custos de reparação, recuperação ou até mesmo de reforço da estrutura afetada são bastante elevados [5].

A corrosão das armaduras do betão é uma das causas de degradação estrutural que mais tem suscitado a curiosidade da comunidade técnico-científica mundial. O nível de corrosão da armadura depende das condições de exposição onde a estrutura se encontra inserida. Ambientes muito ricos em dióxido de carbono, como é o caso dos meios urbanos, são propícios ao desenvolvimento de reações de carbonatação [6].

As armaduras inseridas no interior do betão encontram-se protegidas pelo próprio meio envolvente isto é, pela elevada alcalinidade da solução aquosa contida nos poros de betão. Desta forma, é promovida a formação de uma película passivadora capaz de proteger o aço de oxidação. Sob a ação da carbonatação a solução aquosa perde estabilidade e inicia-se a despassivação do aço, ficando a armadura exposta a risco de corrosão [6].

A camada de recobrimento que envolve o aço desempenha um papel muito importante no fenómeno da carbonatação, pois confere ao betão características de proteção química e física. A barreira química é conseguida através elevada alcalinidade do betão, tal como referido anteriormente, e a física depende das características da própria camada de recobrimento. Se o recobrimento for de boa qualidade, com baixa porosidade, dificulta a difusão do CO_2 no interior do betão [7].

Em climas frios, suscetíveis a temperaturas negativas, a ação dos ciclos gelo-degelo apresenta um papel decisivo no comportamento e na durabilidade das estruturas de betão. Na presença de baixas temperaturas a água contida nos poros de betão congela, provocando um aumento de volume e, conseqüentemente, um aumento da pressão hidráulica nas paredes dos poros. Fatores como o tamanho dos poros, a concentração de alcalis e o efeito da tensão superficial permitem que o congelamento se inicie nos poros maiores e se estenda, gradualmente, aos poros mais pequenos. O degelo inicia-se quando a quantidade de água que anteriormente cristalizou retoma ao seu volume inicial. Com o incremento do número de ciclos gelo-degelo os poros do betão tendem a perder a capacidade de resistir às pressões exercidas o que pode resultar na fendilhação e conseqüente deterioração do betão [8].

No entanto, na prática, as estruturas de betão armado não estão expostas apenas a um mecanismo de deterioração. A carbonatação afeta quase todas as estruturas e algumas delas estão expostas, em simultâneo, a um determinado número de ciclos gelo-degelo. Nestes casos, a difusão do CO_2 nos poros do betão é facilitada pela existência de fendas e fissuras. Assim, a ação combinada de carbonatação e gelo-degelo tem que ser levada em consideração na previsão de vida útil de uma estrutura para que esta seja mais realista.

1.2 - Objetivos do trabalho

O principal objetivo do presente trabalho consiste em avaliar a influência da carbonatação na durabilidade do betão. Para tal, pretende-se determinar e comparar as profundidades de carbonatação obtidas em corpos de prova de betão simples sujeitos, ou não, a ciclos gelo-degelo. Pretende-se também averiguar a influência, nos mesmos corpos de prova, da variação das condições de exposição como a temperatura, humidade relativa e concentração de CO₂ no avanço da frente de carbonatação.

Com o intuito de tornar concebíveis os objetivos em cima descritos, é objeto deste trabalho o desenvolvimento de um dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação que permita, em laboratório, variar a concentração de CO₂ e o teor de humidade relativa.

De forma a caracterizar os corpos de prova destinados ao ensaio acelerado de carbonatação, objetiva-se a realização de alguns ensaios complementares. Estes incluem ensaios de absorção de água por capilaridade e resistência a compressão, para determinação dos parâmetros de durabilidade, e ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio e energia dispersiva de raio-X para a caracterização da microestrutura do betão.

1.3 - Estrutura da dissertação

A presente dissertação foi estruturada em seis capítulos. O presente capítulo constitui uma introdução. Neste capítulo efetua-se uma contextualização do tema, estabelecem-se os objetivos pretendidos e referem-se, sucintamente, as tarefas realizadas ao longo do desenvolvimento do trabalho.

O segundo capítulo contempla uma breve revisão bibliográfica acerca do processo de carbonatação no betão. É descrito o mecanismo de ocorrência da carbonatação, os fatores (internos e externos) que a influenciam e as suas consequências nas estruturas de betão armado. Explica-se o método de cálculo utilizado para estimar a velocidade de penetração do dióxido de carbono no betão e aborda-se o procedimento atualmente utilizado para medir a profundidade de carbonatação nos elementos de betão armado. É também efetuada uma abordagem aos ensaios de carbonatação, acelerados e naturais, especificando as diferenças entre eles. Por fim, no último ponto, aborda-se a problemática da incidência da carbonatação em estruturas de betão submetidas a ambientes muito frios, onde se proporcionam ciclos gelo-degelo.

O terceiro capítulo destina-se à apresentação do dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação, desenvolvido em laboratório. São apresentados todos os seus constituintes, bem

como as suas funcionalidades e assemblagem. É descrito, detalhadamente, o funcionamento do dispositivo e são apresentados os testes preliminares realizados para testar a sua eficácia.

O quarto capítulo apresenta de forma detalhada o programa experimental desenvolvido, contemplando uma descrição dos ensaios preconizados e da metodologia adotada.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos durante o estudo, a análise e discussão dos mesmos.

No sexto capítulo é efetuada uma síntese das conclusões retidas a partir da realização deste trabalho. São também apresentadas algumas sugestões para os trabalhos a desenvolver futuramente.

Finalmente, no sétimo capítulo são apresentadas as referências bibliográficas.

Capítulo 2 - Efeitos da Carbonatação no Betão

2.1 - Enquadramento

O betão é o material de construção mais utilizado pela Humanidade, sendo a sua produção anual cerca de 10,000 milhões de toneladas [9]. Estudos efetuados apontam para uma crescente produção deste material durante as próximas décadas, facto que pode acarretar algumas consequências dado que o cimento Portland é pouco durável e apresenta um fraco desempenho ambiental na sua produção [10].

Segundo Flower e Sanjay, a produção de cimento Portland é responsável por 74 a 81 % das emissões globais de dióxido de carbono e a produção de agregados é responsável por 13 a 20 % [10]. A indústria do cimento representa assim 7 % do total das emissões mundiais de CO₂, facto que não é surpreendente tendo em conta que na produção de uma tonelada de cimento Portland são geradas 0,55 toneladas de dióxido de carbono químico [11; 12]. O aumento da durabilidade das estruturas de betão representaria uma redução significativa do seu impacto ambiental.

A carbonatação é uma das principais causas de deterioração do betão armado. O fenómeno consiste na reação química entre o dióxido de carbono presente na atmosfera e os componentes resultantes da hidratação da pasta de cimento do betão, mais especificamente o hidróxido de cálcio, de modo a formar carbonato de cálcio. Peter *et al.* consideram que a importância das reações químicas que se desenvolvem ao longo deste processo reside na redução da alcalinidade do betão para valores de pH próximos de 8 [13].

A camada de óxidos de ferro que protege o aço da corrosão, camada de passivação, pode ser drasticamente afetada pela carbonatação. Esta camada, com valores iniciais de pH que oscilam entre 12 e 14, pode ser despassivada pela ação do dióxido de carbono e reduzir o seu pH para valores inferiores a 9,5. Desta forma são criadas condições propícias à corrosão das armaduras do betão, sendo este o maior problema de durabilidade das estruturas de betão armado [13].

A taxa de carbonatação é controlada pela difusão de CO₂ nos poros do betão armado que, por sua vez, depende da humidade relativa do material. No ar, a difusão de dióxido de carbono é cerca de 104 vezes mais rápida do que na água [14]. Para humidades relativas muito baixas, inferiores a 50%, a difusão do CO₂ é extremamente rápida. No entanto, se não existir água suficiente nos poros do betão o processo de carbonatação não se desenvolve. Contrariamente, em ambientes com humidade relativa elevada a difusão do gás atmosférico é bastante lenta, pelo que a taxa de carbonatação diminui [15]. No sentido de obter resultados atenuados no que

toca à taxa de carbonatação no interior do betão, a maioria das pesquisas sobre carbonatação no betão utiliza valores de humidade relativa entre 50 e 75 %.

No sentido de avaliar a resistência do betão face à carbonatação são frequentemente utilizados ensaios acelerados, uma vez que em condições naturais a carbonatação é um fenómeno extremamente lento. Em laboratório, as amostras de betão sujeitas a ensaios acelerados são submetidas a concentrações de dióxido de carbono muito superiores às existentes no ar ambiente [16].

Neste capítulo são analisados os aspetos mais importantes do conhecimento atual do processo de carbonatação. É descrito, sucintamente, o processo de fabrico e hidratação do cimento Portland, o mecanismo de ocorrência da carbonatação, os fatores que condicionam a velocidade do processo e a influência nas armaduras do betão armado. São enumeradas algumas técnicas de medição da profundidade de carbonatação no betão e é efetuada uma comparação entre ensaios naturais e acelerados de carbonatação. Por fim, aborda-se a problemática dos ciclos gelo-degelo no processo de carbonatação.

2.2 - Síntese do processo de fabrico e hidratação do cimento Portland

O cimento Portland, patenteado por Joseph Aspdin em 1830, é o principal ligante hidráulico utilizado na Engenharia Civil e assume particular importância no desempenho, qualidade e durabilidade do betão. Após o seu contacto com a água desenvolve reações químico-mineralógicas que permitem a agregação e consolidação dos agregados, resultando no betão de cimento Portland [17].

O principal constituinte do cimento Portland é o clínquer de cimento que, segundo Coutinho, resulta da calcinação, a temperaturas na ordem dos 1450 °C, de uma mistura de calcário (carbonato de cálcio), argila (silicatos, aluminatos, óxidos de ferro) e corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera. Após a junção de aditivos apropriados e de um cuidadoso processo de moagem obtém-se o cimento Portland [18]. A Figura 2.1 representa esquematicamente o processo do fabrico do cimento Portland.

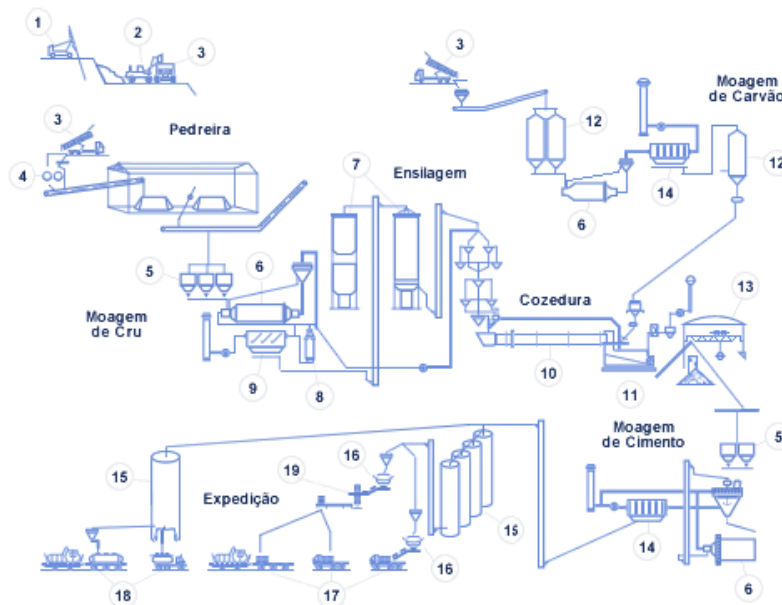


Figura 2.1 - Esquema representativo do fabrico do cimento Portland [19]

Legenda:

1. Perfuradora	5. Tremonhas	9. Electrofiltro	13. Armazém para clínquer	17. Expedição de Cimento em Saco
2. Pás carregadoras	6. Moinhos	10. Forno	14. Filtros de Mangas	18. Expedição de Cimento a Granel
3. Camiões	7. Silos Homo e Armazenamento	11. Arrefecedor	15. Silos para Cimento	19. Paletização
4. Britador	8. Torre de Condicionamento	12. Silos para Carvão	16. Ensacadoras Rotativas	

Em consequência das elevadas temperaturas a que a matéria-prima é sujeita desenvolvem-se reações químicas que, segundo Costa, dão origem aos seguintes minerais mais comuns do clínquer [20]:

Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminato ferrato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

O autor acrescenta que, além dos anteriormente referidos, outros minerais como o sulfato alcalino e cálcico e óxidos de cálcio e magnésio livres constam na composição do clínquer de cimento. No entanto, os quatro primeiros são designados por principais e as suas proporções são variáveis, podendo depender do processo de cozedura, da composição da matéria-prima e do próprio arrefecimento do clínquer. As percentagens de silicato bicálcico variam entre 10 a 55 %, silicato tricálcico entre 60 a 65 %, aluminato tricálcico de 0 a 15 % e aluminato ferrato

tetracálcico entre 5 e 15 %. Assim, estes minerais são responsáveis por cerca de 90 a 95 % da composição do cimento Portland [20]. A Figura 2.2 demonstra as várias transformações das matérias-primas até ao clínquer durante o processo promovido pela ação da temperatura.

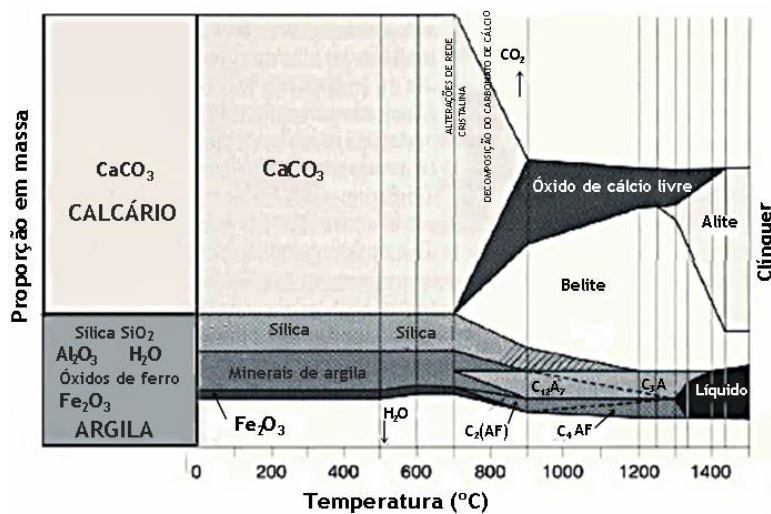


Figura 2.2 - Esquema das transformações ocorridas na matéria-prima até ao clínquer [21] (adaptado)

Na presença de água os minerais que compõem o clínquer de cimento reagem, originando novos compostos estáveis e resistentes. Esta reação denomina-se hidratação. De acordo com Neville, os constituintes do cimento e a água podem reagir de duas diferentes formas: a primeira resulta na incorporação direta de moléculas de água, ou seja, na hidratação propriamente dita; a segunda é a reação de hidrólise da água isto é, a quebra e dissolução de determinados componentes do cimento como por exemplo o gesso, que disponibiliza iões sulfato ao sistema. No entanto, é comum e conveniente utilizar o termo hidratação a todas as reações [22].

Ao longo da hidratação dos componentes do cimento Portland são libertadas grandes quantidades de calor com diferentes amplitudes. Os aluminatos produzem uma taxa de calor mais elevada do que os silicatos porque hidratam muito mais rapidamente. Devido a esta rápida reação com a água é adicionado gesso à mistura do clínquer de forma a retardar a presa [18].

Da reação entre o aluminato tricálcico hidratado e o gesso resulta trissulfoaluminato de cálcio hidratado que, após o consumo do gesso, se torna instável e se transforma em monossulfato de cálcio hidratado. O aluminato ferrato tem um comportamento semelhante ao aluminato tricálcico, embora de forma bastante mais lenta [20].

Segundo Metha e Monteiro (citado por Kihara), a hidratação dos silicatos bicálcico e tricálcico produz uma família de silicatos cálcicos hidratados com estrutura similar entre si, denominados genericamente por CSH. Estes apresentam variedade na sua morfologia, composição e cristalinidade, dependendo do tempo da reação, temperatura e relação água-cimento [17]. A

resistência da pasta de cimento é atribuída, em grande parte, ao silicato tricálcico conforme ilustrado na Figura 2.3.

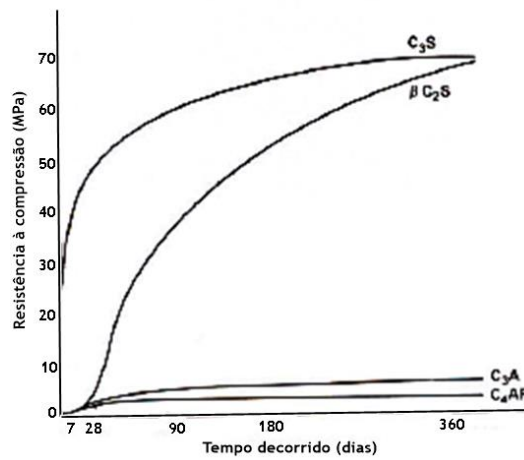


Figura 2.3 - Contributo dos componentes puros do cimento Portland e evolução da resistência à compressão em função do tempo [23] (adaptado)

Através da Figura 2.4 é possível constatar que os produtos resultantes da hidratação do cimento são, predominantemente, o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e o silicato de cálcio hidratado CSH. Estes apresentam estruturas peculiares que, de alguma forma, contribuem para a evolução da carbonatação.

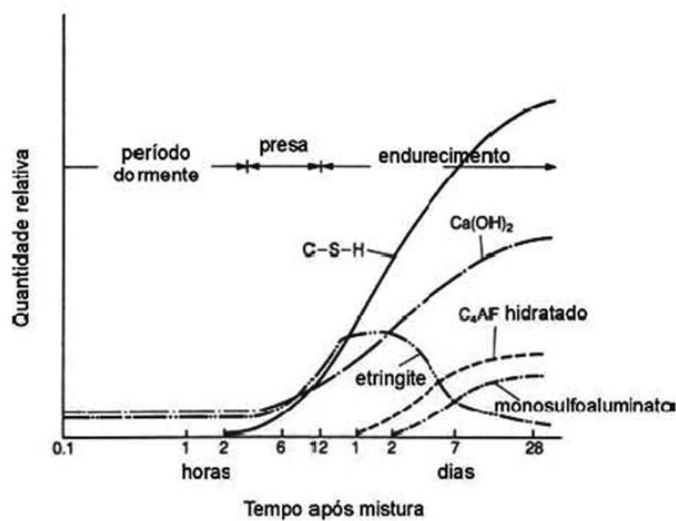


Figura 2.4 - Desenvolvimento dos produtos da hidratação do cimento no tempo [24] (adaptado)

Segundo Neville (citado por Kihara), a hidratação do silicato bicálcico gera cerca de 82 % de CSH e 18 % de hidróxido de cálcio. Por sua vez, a hidratação do silicato tricálcico gera 61 % de CSH e 39 % de hidróxido de cálcio [17]. Castro Gomes *et al.* referem que 20 a 25 % do volume

sólido da pasta de cimento hidratada corresponde ao hidróxido de cálcio, oriundo da hidratação dos silicatos [25].

2.3 - Mecanismo de ocorrência da carbonatação

A carbonatação é um processo físico-químico de neutralização do líquido intersticial existente nos vários poros do betão, onde são envolvidos o hidróxido de cálcio e outros produtos alcalinos. Para que este processo decorra é necessário que se encontre disponível um constituinte ácido no meio envolvente. O dióxido de carbono CO_2 , o gás sulfídrico H_2S e o dióxido de enxofre SO_2 são os principais constituintes da atmosfera que podem proporcionar reações de neutralização. Devido à maior incidência de CO_2 neste tipo de reações, o processo recebe o nome de carbonatação [26].

Uma vez presente no ar atmosférico o dióxido de carbono entra diretamente na mistura de fabrico do betão, interagindo com a hidratação do cimento. No entanto, o agente agressivo é o ácido carbónico uma vez que o CO_2 não é reativo [22].

A difusão é o mecanismo responsável pela penetração do CO_2 nos poros do betão [27]. As Equações 2.1 e 2.2 são as que melhor representam este mecanismo e baseiam-se em leis básicas que têm em consideração que o processo de difusão ocorre em paralelo com reações químicas, pela combinação do CO_2 com o hidróxido de cálcio dissolvido na fase aquosa dos poros de betão [26].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial C_c}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$C_c = R \cdot C \quad (2.2)$$

Onde:

C - concentração de CO_2 na atmosfera.

C_c - concentração de CO_2 que se combina com o hidróxido de cálcio.

R - relação entre C e C_c .

Na prática procura-se simplificar a solução da Equação 2.1 através de aproximações empíricas, tendo em consideração o facto de se tratar de um fenómeno de difusão.

De acordo com Salta, o CO_2 que penetra o interior dos poros do betão reage primeiramente com os hidróxidos de sódio NaOH e potássio KOH , existentes no cimento em menor quantidade, para depois reagir com o hidróxido de cálcio, presente em maior quantidade. Posteriormente,

quando todo o hidróxido de cálcio se esgotar ocorrerão reações a longo prazo entre o gás atmosférico e outros compostos do cimento hidratado, como silicatos e aluminatos de cálcio.

A reação gradual do hidróxido de cálcio com o CO₂ tem como produto final a formação de carbonato de cálcio CaCO₃, conforme a Equação 2.3 [28].



As Equações 2.4 e 2.5 retratam a reação do CO₂ com o NaOH e o KOH, respetivamente [28].



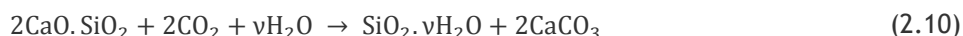
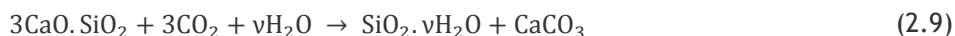
As Equações 2.3, 2.4 e 2.5 são simplificações de um processo que ocorre em várias etapas envolvendo diversas reações secundárias.

Visto que as substâncias NaOH e KOH se encontram em pequenas quantidades na pasta de cimento, o seu papel no processo de carbonatação é muito reduzido. A principal reação associada à carbonatação é aquela que envolve o Ca(OH)₂.

Para que se inicie a carbonatação dos compostos hidratados e esta decorra naturalmente é necessário que o CO₂ existente na fase aquosa dos poros de betão seja solubilizado. Só desta forma será possível a formação de carbonato de cálcio. As seguintes Equações traduzem o fenómeno [26].



Segundo Papadakis *et al.* (citado por Figueiredo), além do hidróxido de cálcio pode ainda ocorrer a carbonatação dos silicatos C₂S e C₃S não hidratados da pasta de cimento endurecida, de acordo com as Equações 2.9 e 2.10 [26].



A carbonatação avança progressivamente a partir da superfície para o interior do betão. À medida que esta se propaga para o interior a velocidade torna-se cada vez mais lenta uma vez que o CO_2 tem que se difundir através do sistema de poros, incluindo a superfície já carbonatada. Desta forma é criada uma “frente de carbonatação”, como representa a Figura 2.5, acompanhada de uma queda de pH cujos valores variam de 12,6/13,5 para um valor inferior a 9,5. Quando todo o hidróxido de cálcio estiver carbonatado o pH pode assumir valores na ordem de 8,3 [27].

A diminuição do pH provoca a suscetibilidade das armaduras no que diz respeito à sua corrosão, uma vez que a camada protetora do aço é eliminada. Desta forma, é muito importante que a frente de carbonatação não atinja a armadura [29].

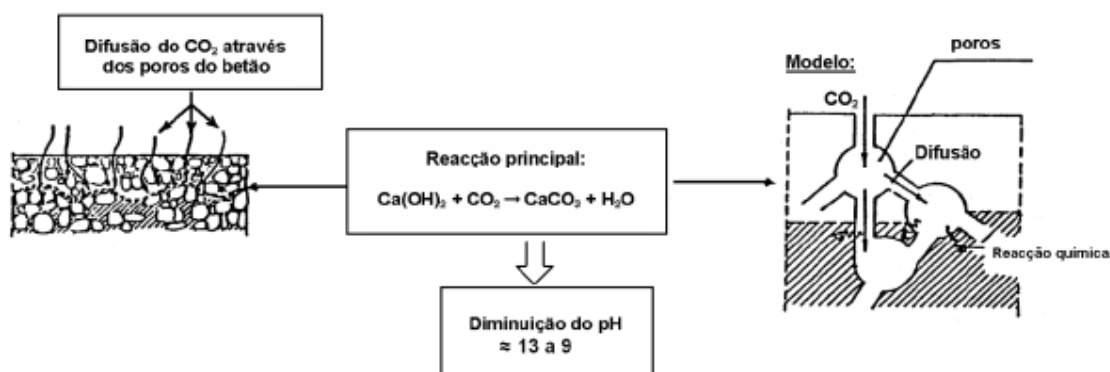


Figura 2.5 - Avanço do processo de carbonatação [28]

Segundo Costa, os valores iniciais de pH do betão devem-se à presença do Ca(OH)_2 no interior dos seus poros. Com o avançar das reações de carbonatação o composto alcalino vai-se dissipando, provocando uma diminuição no pH. Assim, o autor considera a existência de três zonas: a zona carbonatada onde o Ca(OH)_2 foi convertido em CaCO_3 , a zona não carbonatada onde o CO_2 ainda não penetrou e uma zona intermédia onde se desenvolve a reação de carbonatação [27]. A Figura 2.6 representa as zonas descritas.

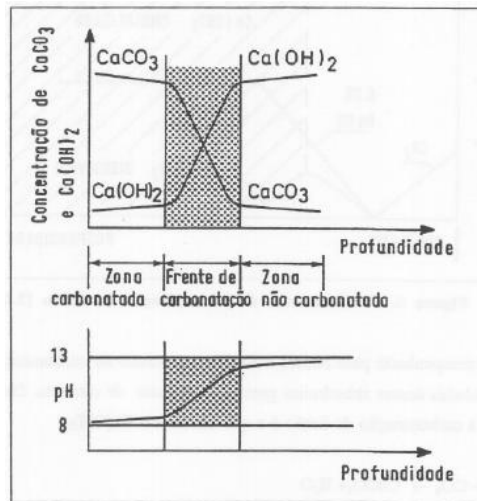


Figura 2.6 - Zonas envolvidas no mecanismo de carbonatação e variação do pH ao longo da profundidade [27]

Cascudo refere que a crescente hidratação do cimento proporciona a criação de elevadas reservas de hidróxido de cálcio no betão o que, associado à sua baixa permeabilidade, confere ao material uma elevada resistência à penetração de CO_2 . Este facto, aliado às baixas concentrações de dióxido de carbono na atmosfera, justifica a lenta velocidade a que geralmente decorre o processo de carbonatação [29].

Na presença de betões constituídos por cimentos ricos em cinzas volantes ou escórias de alto-forno o processo assume um efeito contrário, não desejável. Nestes casos específicos o processo de carbonatação produz um aumento da porosidade capilar, proporcionando uma maior absorção e permeabilidade por parte da camada passivadora que protege o aço das armaduras no betão [30].

2.4 - Fatores que influenciam a velocidade de carbonatação

A velocidade a que ocorre o processo de carbonatação é condicionada, essencialmente, por fenómenos de difusão gasosa em que o principal interveniente é o CO_2 . Os fatores que influenciam o avanço da frente carbonatada, provocando a corrosão de armaduras, podem ser intrínsecos ao betão ou relativos ao meio ambiente. Os fatores intrínsecos dizem respeito à composição do betão e os fatores ambientais são tidos em conta nas classes de exposição para a corrosão induzida por carbonatação. A interação de todos estes mecanismos determina a velocidade de carbonatação.

Kazmierczak (citado por Figueiredo) [26] entende que a velocidade de penetração da frente de carbonatação depende de fatores relacionados com o meio ambiente e com as características finais do betão, conforme o Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação [26]

Fatores Condicionantes		Características Influenciadas
Fatores Ambientais ou Condições de Exposição	Concentração de CO ₂	Mecanismo físico-químico Velocidade de carbonatação
	Humidade relativa do ar	Grau de saturação dos poros Velocidade de carbonatação
Características do betão	Tipo e quantidade de cimento Relação água/cimento	Reserva alcalina Porosidade e permeabilidade
	Condições de cura	Grau de hidratação, porosidade, permeabilidade e fissuração
	Fissuras	Facilita a entrada de CO ₂

Nos pontos seguintes são descritos os principais fatores ambientais e internos que interferem na velocidade do processo de carbonatação do betão.

2.4.1 - Fatores ambientais

Fatores ambientais como a concentração de CO₂, a temperatura, a humidade relativa do ar e a ocorrência de chuvas são determinantes para que ocorra o fenómeno de difusão do CO₂ no betão. Estes fatores irão determinar o grau de saturação dos poros e, conseqüentemente, a taxa de carbonatação.

2.4.1.1 - Concentração de CO₂

O dióxido de carbono é o gás mais importante dos constituintes da atmosfera, representando 0,032 % em volume, e a sua concentração é um importante parâmetro ambiental na taxa de carbonatação [31]. Em ambientes fechados a concentração do gás é significativamente superior à concentração em ambientes abertos que permitam uma constante renovação de ar.

Segundo Helene (citado por Figueiredo), a concentração de CO₂ exerce uma grande influência nas estruturas de betão armado e varia consoante o meio de exposição. Em meios rurais e urbanos a concentração é igual ou inferior a 0,03 % em volume, e em locais com densa ocupação urbana ou industrial pode variar entre 0,30 a 1 % em volume. No caso de túneis, garagens, indústrias e locais pouco ventilados ou onde a produção de CO₂ é significativa, os valores anteriormente mencionados podem ser muito superiores. Os valores mais baixos são registados em zonas costeiras, uma vez que a água absorve o dióxido de carbono [26].

Em ambientes naturais, onde a taxa de difusão do CO₂ é muito baixa, a profundidade de carbonatação obtida nas estruturas de betão é muito reduzida. Neste caso, é necessário um longo período de exposição ao CO₂ para que se consigam atingir apenas poucos milímetros [4]. No sentido de obter respostas mais rápidas em relação ao fenómeno da carbonatação, são geralmente empregados pela comunidade científica ensaios acelerados de carbonatação, cujos teores de CO₂ podem variar entre 1 e 100 %.

Mehta e Monteiro (citado por Figueiredo) alertam para a possibilidade de alteração da microestrutura do betão, aquando da utilização de elevadas concentrações de CO₂, em ensaios acelerados. A reação entre o hidróxido de cálcio e o dióxido de carbono, que resulta na formação de carbonato de cálcio e água, poderá tornar-se instável pela formação de ácido carbónico que, por sua vez, provocará a transformação do carbonato de cálcio (insolúvel) em bicarbonato de cálcio (solúvel). Nas Equações 2.11 e 2.12 são descritas as reações que podem ocorrer entre o gás carbónico e o hidróxido de cálcio quando sujeitos a altas concentrações de CO₂ [26].



Em 1993, Uomota e Takada realizaram um estudo de forma a obter uma relação entre a concentração de CO₂ e a velocidade da frente de carbonatação. Para tal, submeteram várias amostras de betão armado, com a mesma temperatura e humidade relativa, a diferentes concentrações de CO₂ que variavam entre 0,07 % (ambiente natural), 1 % e 10 % (ensaio acelerado). Com base na Figura 2.7 pode verificar-se que o aumento do teor de dióxido de carbono proporcionou uma maior velocidade de carbonatação no betão [32].

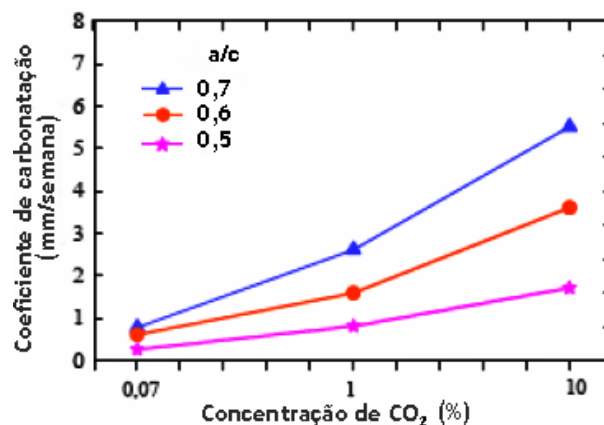


Figura 2.7 - Influência da concentração de CO₂ no coeficiente de carbonatação [32] (adaptado)

Atualmente as concentrações de CO₂ tendem a crescer devido à excessiva produção de gases por parte dos países em vias de desenvolvimento. Quanto maior for a concentração deste gás no ambiente mais agressivo este será e, conseqüentemente, maior será o grau de deterioração das estruturas nele inseridas [33]. No Quadro 2.2 relaciona-se a agressividade do ambiente com o risco de deterioração da estrutura.

Quadro 2.2 - Classificação da agressividade do ambiente [26]

Classe de agressividade	Agressividade	Risco de deterioração da estrutura
I	fraca	insignificante
II	média	pequeno
III	forte	grande
IV	muito forte	elevado

2.4.1.2 - Humidade relativa

A humidade relativa é um fator muito importante na carbonatação do betão uma vez que exerce uma grande influência na quantidade de água contida nos seus poros que, por sua vez, condiciona a velocidade de difusão do CO₂ para o interior do betão [34].

Em condições de baixa humidade, onde a quantidade de água é muito reduzida, o CO₂ que se difunde através dos poros do betão não tem como se dissolver e o fenómeno de carbonatação não decorre. Porém, na situação em que os poros do betão se apresentam saturados de água o CO₂ dissolve-se facilmente mas, devido à sua baixa taxa de difusão, o processo da carbonatação é retardado. A velocidade máxima da carbonatação ocorre numa situação intermédia devido à coexistência de dois fatores, a água e a possibilidade de difusão do dióxido de carbono [26]. Através das Figuras 2.8, 2.9 e 2.10 é possível verificar o teor de humidade dos poros em função da humidade do ambiente.

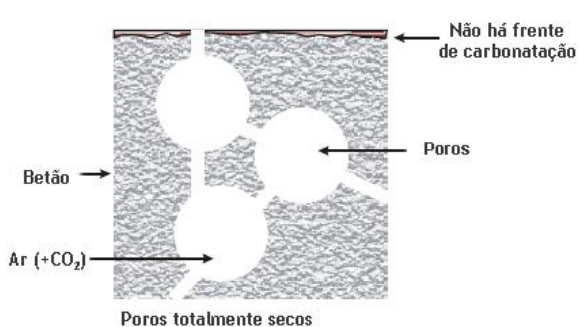


Figura 2.8 - Poros totalmente secos: não ocorre carbonatação [29] (adaptado)

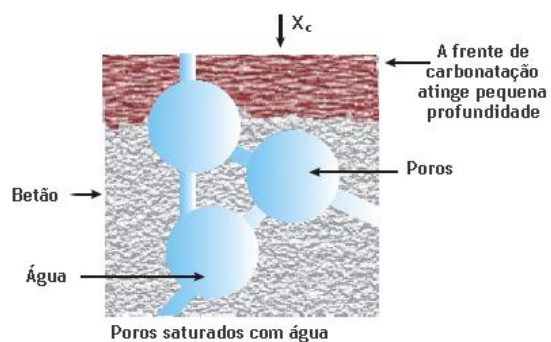


Figura 2.9 - Poros saturados: avanço da frente de carbonatação no betão é mínima [29] (adaptado)

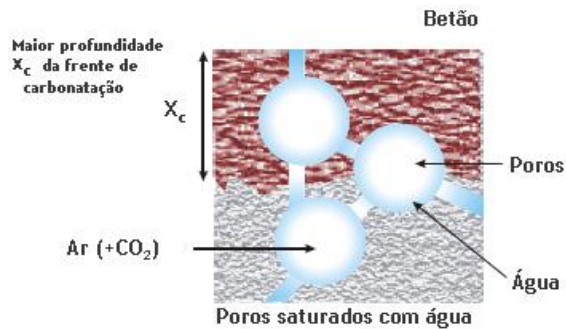


Figura 2.10 - Poros parcialmente preenchidos com água: avanço da frente de carbonatação é inevitável [29] (adaptado)

O betão absorve rapidamente a humidade do ambiente exterior e, em contrapartida, seca rapidamente. Quando a humidade do exterior é aproximadamente constante, é possível existir um equilíbrio entre a humidade existente no interior do betão e a humidade relativa exterior. Se a humidade exterior variar, o interior do betão não acompanha as trocas gasosas com a mesma velocidade e apenas a camada exterior da estrutura estará em equilíbrio com a humidade relativa do ambiente [35].

Em 1999, Northwood *et al.* levaram a cabo uma investigação onde avaliaram a influência da humidade relativa na profundidade de carbonatação. Realizaram um ensaio acelerado de carbonatação no qual utilizaram uma taxa de CO_2 de 6 % e humidades relativas de 52, 64, 75, 84 e 92 %. Foram ensaiados provetes de betão com classes de resistência distintas. Os resultados obtidos indicaram que, para todas as classes de resistência analisadas, houve um aumento na profundidade de carbonatação com o incremento da humidade de 52 para 75 % [36].

Vários autores dedicaram-se a estudar a influência da humidade relativa na profundidade de carbonatação de betões. No entanto, não existe um consenso acerca de um valor de humidade relativa ótima para as reações de carbonatação, mas sim um intervalo compreendido entre 50 e 75 %. Dentro deste intervalo uma pequena camada de água sobre a parede dos poros do betão possibilita a reação química de carbonatação, sem impedir a difusão do CO_2 para o seu interior.

A relação da humidade com a profundidade de carbonatação em função do tempo é muito complexa pois envolve ciclos de molhagem e secagem a que as estruturas de betão podem estar sujeitas.

A partir da Figura 2.11 pode concluir-se que o maior grau de carbonatação ocorre quando a humidade relativa se situa entre 50 e 75 %. Por outro lado, situações de humidade inferior a 20 % ou superior a 95 % a carbonatação ocorre lentamente ou simplesmente não ocorre.

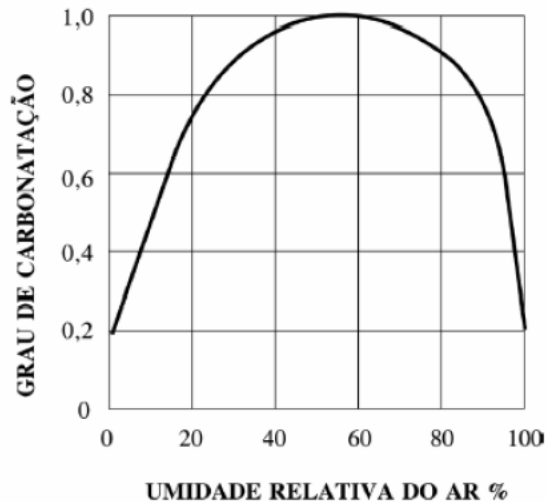


Figura 2.11 - Relação entre o grau de carbonatação e a umidade relativa do ar [37]

A relação da umidade com a profundidade de carbonatação em função do tempo é muito complexa pois envolve ciclos de molhagem e secagem a que as estruturas de betão podem estar sujeitas.

2.4.1.3 - Temperatura

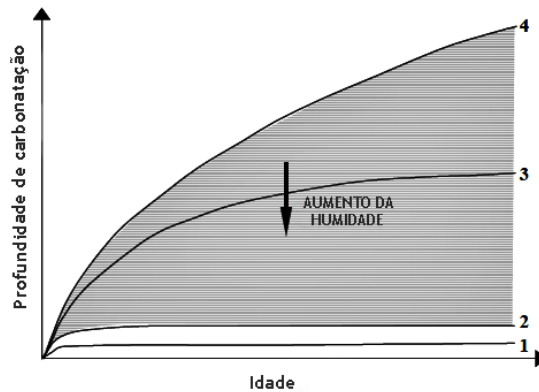
Pequenas variações de temperatura exercem, segundo Neville, pouca influência na velocidade de carbonatação. No entanto, a ação de temperaturas elevadas nas armaduras do betão provoca um aumento na velocidade de corrosão das mesmas. Desta forma, o seu efeito deve ser contabilizado na estimativa da durabilidade de uma estrutura de betão armado [22; 38].

Kazmierczak explica que quaisquer variações de umidade e temperatura, quando a umidade interna do betão se encontra em equilíbrio com o meio envolvente, podem influenciar na existência de vapor ou na saturação dos poros do betão e, conseqüentemente, na velocidade de carbonatação [38]. Segundo Papadakis *et al.*, para oscilações de temperatura entre 20 e 45 °C não ocorre qualquer tipo de aceleração na velocidade de carbonatação, quando mantidas as outras condições de exposição [39].

Tuutti considera que o acréscimo da temperatura proporciona uma maior mobilidade das moléculas, facilitando o transporte de substâncias e atuando como acelerador das reações químicas, facto que permite uma maior penetração do CO₂ no betão. Desta forma, é evidente a influência que a temperatura exerce sobre os coeficientes de difusão [40].

2.4.1.4 - Ocorrência de chuvas

As condições de exposição a que uma estrutura pode estar sujeita apresentam uma grande influência na carbonatação do betão. Vários autores realizaram estudos no sentido de avaliar a carbonatação do betão em ambientes internos e externos, protegidos ou não da chuva. Através da Figura 2.12 é possível relacionar a ação do meio de exposição com a carbonatação do betão.



Legenda:

- 1 - Betão constantemente submerso ou em ambiente húmido;
- 2 - Superfícies externas horizontais de betão em clima húmido;
- 3 - Betão em ambiente externo desprotegido da chuva e neve;
- 4 - Betão em ambiente externo protegido da chuva e neve.

Figura 2.12 - Efeito das condições de exposição na carbonatação [41] (adaptado)

Estruturas expostas à permanente incidência da chuva e neve apresentam profundidades de carbonatação inferiores em relação a estruturas protegidas das mesmas ações, uma vez que a frente de carbonatação é impedida de avançar devido à saturação dos poros do betão [22].

Barker e Matthews concluíram que betões armazenados em laboratório, com humidade relativa de 65 % e temperatura de 20 °C, carbonatam mais rapidamente do que betões armazenados em ambiente exterior protegido da chuva. Segundo os autores, a profundidade de carbonatação dos betões armazenados em ambiente exterior apresenta uma redução de cerca de 40 % relativamente aos armazenados em laboratório [42].

2.4.2 - Características do betão

As características intrínsecas ao betão são de fundamental importância no mecanismo de carbonatação. O tipo e quantidade de cimento, o grau de hidratação, a relação água/cimento e a cura são fatores que definem a permeabilidade do betão. Todos estes fatores devem ser levados em conta aquando da projeção e estimativa da vida útil de estruturas em betão armado.

A relação água/cimento influencia diretamente na porosidade, microestrutura e resistência do betão. As condições de cura, relacionadas com a execução do betão, e a existência de fissuras são determinantes no processo de carbonatação.

2.4.2.1 - Tipo e quantidade do cimento

O tipo de cimento utilizado na produção do betão condiciona a quantidade de compostos alcalinos disponíveis para reagir com o CO_2 . Quanto menor for o teor de alcalis na pasta de cimento maior será a velocidade de penetração da frente de carbonatação.

A introdução de adições minerais nos betões tem sido efetuada de forma a garantir a densificação da matriz porosa, a redução da permeabilidade do betão e o aumento da sua resistência à compressão. No entanto, apesar das vantagens apresentadas, vários autores defendem que cimentos providos de adições apresentam menor resistência à carbonatação do que os cimentos puros. Este fato ocorre devido à diminuição do teor de Ca(OH)_2 , tornando o betão mais suscetível a carbonatação [26].

Segundo Neville (citado por Figueiredo), em igualdade de condições de ensaio, os cimentos com adições apresentam uma menor resistência à carbonatação que os cimentos Portland desprovidos de qualquer tipo de adição. Para o CEB/BI 152 (citado por Figueiredo) a resistência à carbonatação do cimento depende das condições de cura a que este foi sujeito [26].

Bauer e Monteiro (citado por Figueiredo) ao utilizarem nos seus estudos cerca de 24 % de adição de escória concluíram que, apesar do efeito benéfico de refinamento dos poros, o teor de Ca(OH)_2 disponível para reagir com o CO_2 diminui. Desta forma, a reserva alcalina do betão é reduzida o que, conseqüentemente, provoca uma diminuição da sua resistência à compressão [26]. Em betões com quantidades de escória superiores a 60/70 %, a fraca resistência à carbonatação é ainda mais acentuada pelo que a profundidade de carbonatação é cerca de 1,5 vezes superior à do betão com cimento Portland desprovido de adições. Se o teor de escória utilizado não for muito elevado, a carbonatação não se agravará desde que a cura seja realizada de forma adequada e o betão apresente uma boa qualidade [28].

Alonso e Andrade (citado por Figueiredo) constataram nas suas pesquisas que as adições pozolânicas, apesar de reduzirem a permeabilidade do betão, promovem reações que consomem a alcalis libertada no processo de hidratação, conduzindo a um aumento da velocidade da frente de carbonatação [26].

Estudos realizados apontam que a substituição de uma fração de cimento por sílica ativa e cinza volante aumenta a carbonatação em cerca de 18 e 50 %, respetivamente. Quando a substituição é feita nos agregados, a carbonatação diminuiu cerca de 25% com sílica ativa e entre 25 a 50% com cinzas volantes [43].

Gastaldini *et al.* (citado por Figueiredo) defendem que, no que toca à carbonatação, o desempenho do betão depende da forma como a adição é incorporada, por substituição ou adição, e do teor utilizado. No caso em que a adição é incorporada por substituição ocorre uma diminuição da reserva alcalina, que se sobrepõe ao refinamento dos poros promovido pelas adições, conduzindo ao avanço da frente de carbonatação. Nestas situações, o uso de adições de escória em substituição não é uma boa solução para a resistência da estrutura à carbonatação. Quanto mais fina for a escória maior será a frente de carbonatação, uma vez que a finura representa um fator extremamente positivo na reatividade deste tipo de aditivo. Reagindo mais intensamente, maior será a quantidade de Ca(OH)_2 consumida [26].

A profundidade de carbonatação diminui com o aumento da quantidade de cimento por metro cúbico de betão. No entanto, em alguns ensaios, a consistência do betão não é mantida constante com o aumento da quantidade de cimento [26].

A partir dos seus ensaios, Ho e Lewis (citado por Figueiredo) traçaram o gráfico representado na Figura 2.13, através do qual é possível concluir que a adição de cinza volante ao betão de cimento Portland provoca o aumento da carbonatação. Através do gráfico verifica-se, também, que o aumento da quantidade de cimento, por metro cúbico, aumenta a carbonatação.

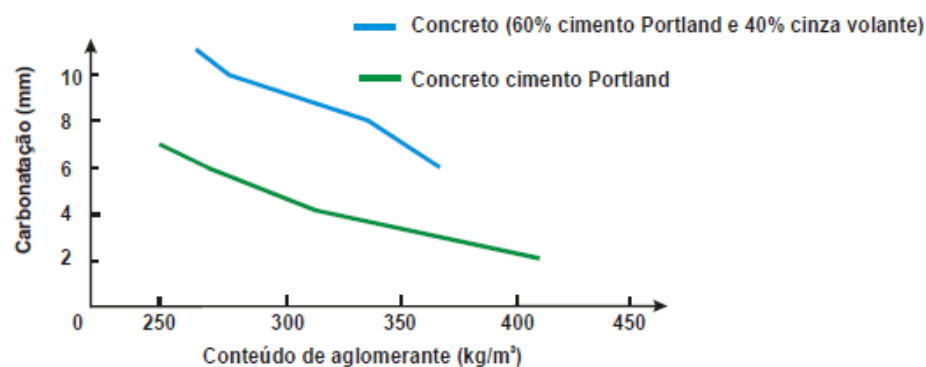


Figura 2.13 - Influência do tipo de cimento e da sua quantidade, por m3 de betão, sobre a profundidade de carbonatação [26]

O uso dos vários tipos de adições disponíveis deve ser ponderado e realizado de forma a melhorar as características do betão, mas nunca substituir o cimento na sua totalidade, uma vez que também possui vários aspetos negativos na durabilidade do betão.

2.4.2.2 - Grau de hidratação

Nas primeiras idades os poros do betão encontram-se saturados, pelo que a difusão do CO_2 e as reações de carbonatação praticamente não ocorrem. Numa fase posterior, aquando das reações de hidratação do cimento e conseqüente evaporação de água, ocorre a secagem do betão.

Nesta fase, os espaços vazios do cimento vão sendo preenchidos pelos produtos sólidos resultantes da hidratação, e a água livre vai sendo evaporada até que seja atingido um ponto de humidade em equilíbrio com o ambiente exterior [4].

Assim, em idades mais avançadas, a carbonatação do betão é restringida pela menor permeabilidade do mesmo. As reações de carbonatação, por serem diretamente influenciadas pela humidade interna e pela estrutura interna das matrizes cimentícias, são também influenciadas pela idade e pelo grau de hidratação do betão [44].

2.4.2.3 - Relação água/cimento

A relação água/cimento controla todas as propriedades relacionadas com a microestrutura do betão endurecido, pelo que se encontra intimamente relacionada com o tamanho e quantidade de poros e com as propriedades mecânicas finais do betão, assumindo um papel muito importante no que toca à permeabilidade de gases e, conseqüentemente, na velocidade de carbonatação [4].

O aumento da relação água/cimento implica um aumento da permeabilidade e porosidade da pasta de cimento hidratada, facilitando a difusão de CO_2 e garantindo uma maior profundidade de carbonatação. Segundo Neville, um betão com relação água/cimento de 0,6 atinge ao fim de 15 anos uma profundidade de carbonatação de 15 mm. Para uma relação água/cimento de 0,45 o autor afirma que a mesma profundidade de carbonatação é atingida após 100 anos [22].

A Figura 2.14 mostra a variação da profundidade de carbonatação em função do tempo e da relação água/cimento.

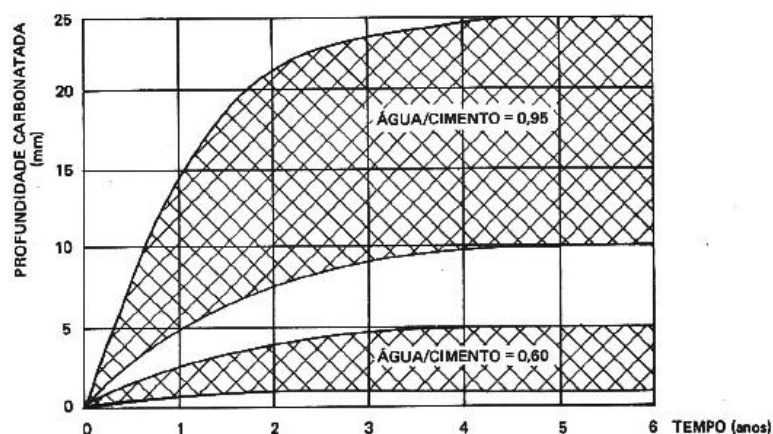


Figura 2.14 - Variação da profundidade de carbonatação em função da relação água/cimento [45]

No seu estudo em betões com adição de sílica ativa, Kulakowski aponta que para relações água/cimento compreendidas entre 0,45 e 0,5 o comportamento do betão face à carbonatação é bastante crítico. Abaixo deste intervalo a carbonatação é somente regida pela porosidade da matriz cimentícia, pelo que o teor de Ca(OH)_2 e pH apresentam pouca influência no fenómeno. Para intervalos superiores ao referido, as características químicas do betão passam a exercer um efeito favorável ao aumento da profundidade de carbonatação e o consumo de Ca(OH)_2 nas reações pozolânicas promovidas pela sílica são favoráveis à carbonatação [46].

Silva explica que o aumento da profundidade de carbonatação em betões com elevada relação água/cimento e com adição de sílica é promovido pela diminuição de Ca(OH)_2 no composto [47].

2.4.2.4 - Condições de cura

A cura no betão é um fator determinante na velocidade de carbonatação. Situações de cura mal efetuada propiciam o aparecimento de fissuras e facilitam a penetração do CO_2 , o que conduz a um aumento da profundidade de carbonatação no betão [48].

Em ambientes com temperatura e humidade controladas, quanto maior for o período de cura maior será o grau de hidratação do cimento. Desta forma é garantida uma menor permeabilidade e porosidade do betão e, conseqüentemente, uma menor taxa de carbonatação, como mostra a Figura 2.15 [26]. Contudo, um atraso no início da cura implica uma maior taxa de carbonatação [48].

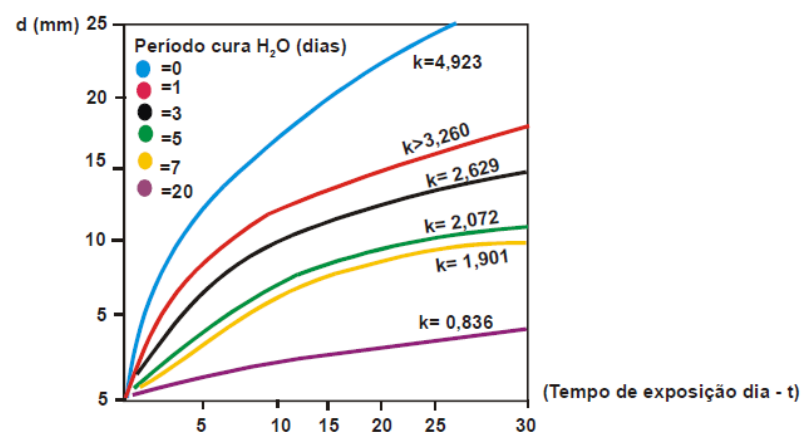


Figura 2.15 - Profundidade de carbonatação (d) em função do tempo de exposição (t), influenciado pelo regime de cura [48]

Em betões com adição de escória de alto-forno uma cura húmida e prolongada conduz a uma hidratação inicial lenta, resultando num sistema de poros capilares que permite a perda de água em condições de secagem. Desta forma, a porosidade do betão é reduzida uma vez que não são formados novos poros capilares durante a passagem da água. Segundo Osborne (citado

por Neville) uma má cura de betões com este tipo de adições proporciona profundidades de carbonatação elevadas, na ordem dos 10 a 20 mm por ano [22].

Tal como demonstra a Figura 2.16, a cura ao ar origina profundidades de carbonatação muito superiores comparativamente à cura húmida. Isto porque, em poros saturados com água, a difusão do CO_2 é mais lenta e, conseqüentemente, a velocidade de carbonatação também.

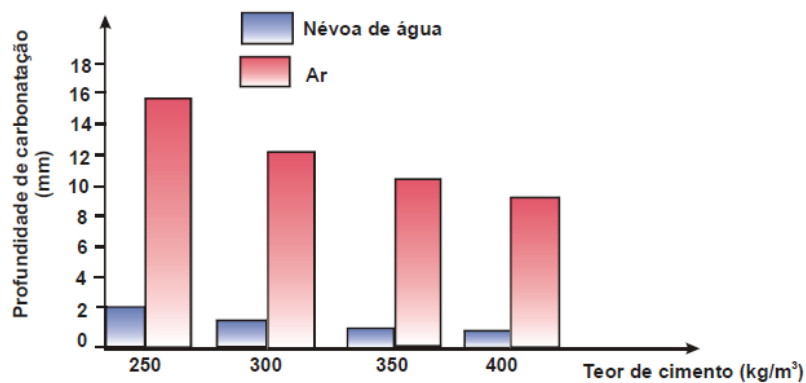


Figura 2.16 - Profundidade de carbonatação, após 365 dias em prismas pequenos, em função do tipo de cura e do teor de cimento [48]

Ensaio realizado por Thomas e Mathews [49], onde foi avaliado o efeito da cura na carbonatação ao longo de 4 anos, comprovam que ocorre uma diminuição da profundidade de carbonatação em betões curados durante períodos de tempo alargados, como mostra a Figura 2.17.

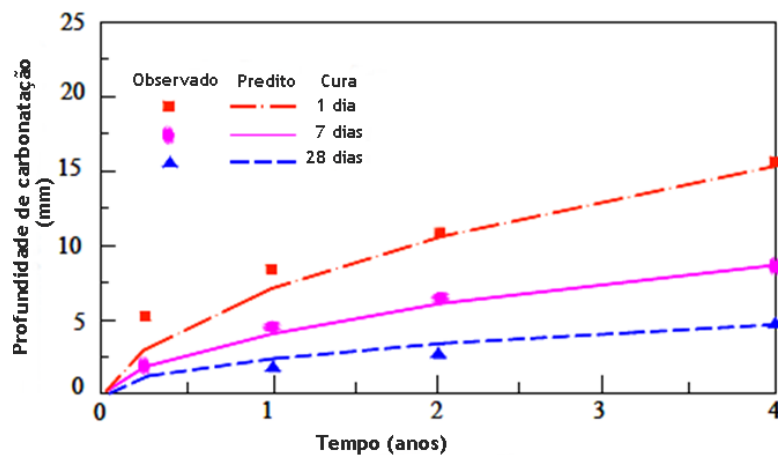


Figura 2.17 - Influência da cura na profundidade de carbonatação [49] (adaptado)

2.4.2.5 - Fissuras

A fissuração é um parâmetro interno diretamente relacionado com a velocidade de carbonatação no betão. Na existência de fissuras superficiais o dióxido de carbono penetra mais rápido e profundamente no interior do betão, podendo atingir as armaduras e provocar a sua corrosão [26].

Dependendo das características da fissura, da alcalinidade do betão e da quantidade de água presente, a carbonatação pode dar origem ao fenómeno de auto-cicatrização da fissura, vedando-a, pela acumulação de carbonatos na sua superfície. Perante estas condições, as estruturas fissuradas sujeitas a carbonatação podem ser tratadas como estruturas não fissuradas [40].

A Figura 2.18 apresenta esquematicamente o processo de penetração e difusão do CO₂ através de uma fissura.

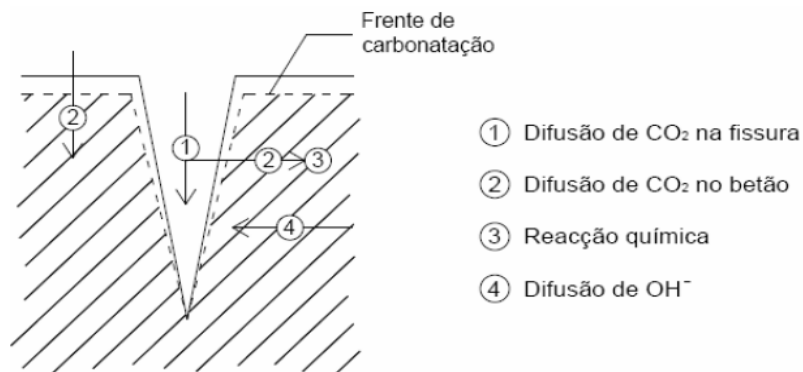


Figura 2.18 - Representação esquemática da carbonatação no interior de uma fissura [26]

2.5 - Cálculo da velocidade de penetração do CO₂ no betão

Devido à existência de inúmeros fatores que influenciam a carbonatação, seria difícil utilizar um modelo que tivesse em consideração todos os elementos envolvidos. A Equação 2.13 é a mais utilizada para estimar a velocidade do processo de carbonatação [26].

$$e_{\text{CO}_2} = k \times \sqrt{t} \quad (2.13)$$

Onde:

e - espessura carbonatada (mm).

k - coeficiente de carbonatação (mm.ano^{-1/2}).

t - tempo de exposição (anos).

Segundo Smolczyk (citado por Figueiredo), a equação apresenta pouca divergência entre os resultados obtidos experimentalmente e estimativas teóricas no intervalo entre 5 a 30 anos. No entanto, o autor acrescenta que, os resultados obtidos pela equação podem não ser os mais viáveis quando fatores alteráveis com o tempo assumem maior importância, como por exemplo a variação da porosidade em relação ao conteúdo de umidade do betão e ao grau de hidratação [26].

2.6 - Medição da profundidade de carbonatação

O conhecimento da profundidade de carbonatação é cada vez mais importante para o controle do tempo necessário até à despassivação da armadura. Neste sentido, vários são os métodos utilizados para avaliar se o betão se encontra ou não carbonatado.

Técnicas avançadas, de grande fiabilidade e rigor, como a difração de raio-x (XRDA), a análise térmica diferencial (DTA), a termogravimetria (TGA) e a espectroscopia de infravermelhos por transformada de Fourier (FTIR) têm vindo a ser utilizadas na deteção da carbonatação no betão. A difração de raio-x é utilizada com o objetivo de determinar a distribuição de cristais de Ca(OH)_2 e CaCO_3 no betão enquanto que a termogravimetria, sendo uma técnica quantitativa, permite determinar com exatidão as concentrações destes cristais. A análise térmica diferencial, sendo um ensaio qualitativo, permite caracterizar as várias substâncias que compõem o cimento através da sua temperatura. Por fim, através da técnica de espectroscopia de infravermelhos é possível obter um espectro de infravermelhos da amostra e calcular o pico de ligações carbono-oxigénio presentes nos cristais de CaCO_3 , correspondente à frente de carbonatação. O uso de microscópio é uma técnica muitas vezes requerida pois permite a visualização direta da presença de cristais de CaCO_3 [30].

Contudo, a utilização de indicadores químicos é a técnica mais utilizada para medir a profundidade de carbonatação pela facilidade e rapidez das leituras. Os indicadores químicos reagem na fase líquida contida nos poros do betão, exibindo a cor correspondente ao intervalo do pH que se verifica. Apesar de não conseguirem mostrar com precisão onde se encontra a frente carbonatada, estes indicadores permitem identificar a região onde ocorre uma mudança do pH [30]. O Quadro 2.3 mostra as mudanças de cor e intervalos de pH associados ao uso de indicadores químicos.

Quadro 2.3 - Propriedades dos principais indicadores químicos usados para observação visual da região carbonatada [50] (adaptado)

Indicador	Intervalo de mudança de cor		Formulação
	Intervalo de pH	Mudança de cor	
Vermelho de cresol	7,2 - 8,8	Amarelo/Vermelho	0,1g/100 ml de etanol
Fenolftaleína	8,0 - 9,9	Incolor/Rosa	0,1g/100 ml de etanol
Timolftaleína	9,3 - 10,5	Incolor/Azul	0,1g/100 ml de etanol
Amarelo de alizarina	10,0 - 12,1	Amarelo claro/Amarelo escuro	0,1g/100 ml de etanol
Alizarina	10,1 - 12,1	Vermelho/Púrpura	0,1g/100 ml de etanol
Azul de Nil	10,1 - 11,1	Azul/Vermelho	0,1g/100 ml de água

A fenolftaleína é dos indicadores químicos mais utilizados uma vez que, apesar de apresentar como desvantagem um dano superficial localizado no betão, o seu ponto de viragem de coloração coincide com os valores de pH para os quais se considera haver carbonatação, como mostra a Figura 2.19. Quando pH do betão decresce para valores próximos de 9, este indicador passa de incolor para uma tonalidade rosa-carmim ou lilás, conforme a Figura 2.20. A coloração da fenolftaleína tende a esbater-se, pelo que a leitura da profundidade de carbonatação deve ser realizada rapidamente [30]. Segundo Thiery, quanto mais alto for o ponto de viragem, maior será a profundidade de carbonatação [50].

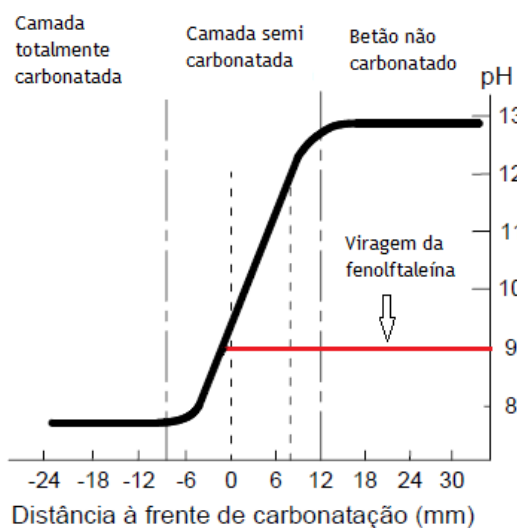


Figura 2.19 - Gradiente de pH na frente de carbonatação [51] (adaptado)



Figura 2.20 - Indicador de fenolftaleína para medição da carbonatação [30] (adaptado)

Medidores digitais e sensores embebidos, são exemplos de indicadores de pH mais sofisticados que fornecem leituras diretas do pH e têm a vantagem de serem de baixa manutenção. Os resultados obtidos através destes procedimentos devem ser relacionados com outros indicadores de pH, como a fenolftaleína [52].

2.7 - Influência da carbonatação nas armaduras

A corrosão de armaduras é uma das principais causas de deterioração e encurtamento da vida útil das estruturas de betão armado. Para uma melhor previsão da vida útil deste tipo de estruturas é indispensável o conhecimento de todos os mecanismos envolvidos na corrosão.

A elevada alcalinidade do meio onde se encontra inserido o betão, com pH compreendido entre 12,5 e 13,5, proporciona a formação de uma delgada e aderente película em torno das armaduras que desempenha a função de barreira ao ataque dos agentes agressivos do meio. Este processo designa-se de passivação devido à forte alcalinidade [18; 53]. Segundo Cascudo, a película de passivação pode ser resultado da combinação de ferrugem superficial com o hidróxido de cálcio, formando ferrato de cálcio, conforme a Equação 2.14 [29].



A carbonatação é responsável pelo início da corrosão de armaduras uma vez que o CO_2 , ao consumir o hidróxido de cálcio existente nos poros do betão, conduz a uma diminuição do pH do betão. Quando o betão que envolve as armaduras se encontra totalmente carbonatado e o pH assume valores próximos de 8, estão criadas as condições para a despassivação das armaduras com conseqüente corrosão das mesmas.

Segundo Costa, existem duas fases distintas do processo de corrosão: a fase de iniciação e a de propagação. A fase de iniciação corresponde ao período em que ocorre a penetração dos agentes agressivos no betão e a sua concentração ao nível das armaduras, causando a destruição da película passiva. Segundo o autor, a deterioração do betão nesta fase é insignificante mas condicionante para a vida útil das estruturas de betão. A fase de propagação, que depende da condição da superfície do betão e do ambiente envolvente nas armaduras, encontra-se associada ao mecanismo de desenvolvimento da corrosão e respetivos produtos [54]. A Figura

2.21 representa o modelo, desenvolvido por Tuutti, para a degradação do betão sobre ação da carbonatação.

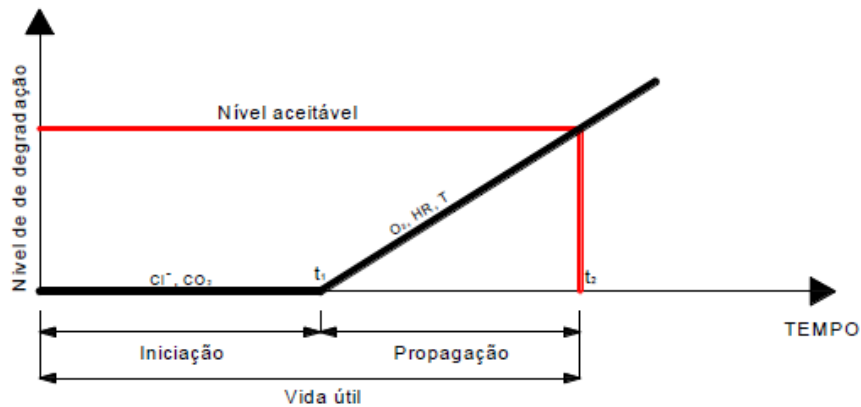


Figura 2.21 - Modelo de vida útil de Tuutti [40] (adaptado)

Segundo Helene, a corrosão de armaduras é um ataque de natureza eletroquímica originado pelo desenvolvimento de uma corrente elétrica entre duas zonas da armadura, a zona anódica e a catódica, com origem no fluxo de eletrões [45].

Na zona anódica, onde é gerada a despassivação da armadura, ocorre a dissolução do ferro com consequente redução da secção, formação de iões Fe^{2+} e libertação de eletrões. Os eletrões libertados movimentam-se ao longo da armadura até atingir a zona catódica, onde se desenvolvem reações de redução do oxigénio e, conseqüentemente, a formação de iões OH^- . Por sua vez, os iões OH^- percorrem a solução eletrolítica até atingir o ânodo onde vão reagir com o ião ferro, produzindo a designada ferrugem [53].

As seguintes Equações retratam as reações que decorrem no circuito fechado anteriormente descrito.



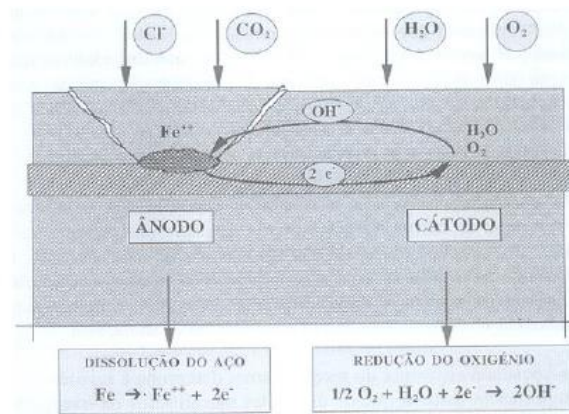


Figura 2.22 - Modelo simplificado da corrosão do aço no betão [54]

Os produtos do processo corrosivo acumulam-se em torno das armaduras e ocupam um volume entre 3 a 10 vezes superior ao volume inicial do aço. Geram-se, então, expansões internas que conduzem à fissuração do betão e facilitam a entrada de agentes agressivos, provocando um posterior lascamento e destacamento do recobrimento que coloca a armadura exposta [22]. A forma final dos produtos de corrosão, provenientes das reações que se desenvolvem na zona anódica, depende das condições de humidade e da disponibilidade de oxigénio.

2.8 - Ensaios de carbonatação

A durabilidade do betão pode ser significativamente afetada por diversos agentes e mecanismos de agressão a que este se encontra exposto. O comportamento especulativo deste material tem incentivado à constante investigação da garantia do seu tempo de vida útil, pelo que é importante conhecer o seu comportamento quando sujeito à ação de agentes de degradação e conseguir avaliar os seus efeitos no tempo.

Torna-se assim fundamental conceber ensaios laboratoriais que simulem de forma plausível o conjunto de mecanismos e condições que afetam a durabilidade do betão, contribuindo desta forma para o melhoramento das características do material.

A avaliação do comportamento do betão, face ao fenómeno da carbonatação, pode ser realizada a partir da exposição do material ao ambiente natural - ensaios ao natural - ou a ambientes com condições de temperatura, humidade relativa e concentrações de dióxido de carbono controladas - ensaios acelerados.

2.8.1 - Ensaio ao natural

Os ensaios ao natural, que também recebem o nome de não acelerados, de campo ou de longa duração, têm como princípio básico a exposição de amostras de betão ao ambiente de degradação natural, protegido ou não das condições atmosféricas [55].

A carbonatação é um fenómeno que progride muito lentamente em estruturas de betão armado expostas ao ambiente natural de degradação. Tal facto deve-se à baixa concentração de CO₂ na atmosfera, na ordem dos 0,04 % em volume, que possibilita a invalidez do tempo de espera para a determinação da velocidade de carbonatação [56].

Estruturas de betão armado sujeitas a ensaios de degradação natural em ambiente interno tendem a apresentar profundidades de carbonatação superiores em relação às mesmas estruturas em ambiente externo. Assim, pode aferir-se que a condição de exposição das amostras tem grande influência nos resultados obtidos [56].

De acordo com John (citado por Possan), existem algumas vantagens e desvantagens na utilização deste tipo de ensaios. Como vantagens destacam-se a interação real com o meio de agressão, a exposição às condições atmosféricas e a possibilidade de avaliação da degradação devido ao efeito sinérgico dos agentes agressivos. Como desvantagens o autor refere o longo período de tempo para a degradação, o vasto leque de fatores agressivos que dificultam isolar e determinar um efeito específico e a impossibilidade de controlo do ensaio [55].

A maior parte dos ensaios naturais são realizados com o intuito de correlacionar os dados obtidos com resultados de estudos acelerados. Esta comparação permite estabelecer coeficientes de aceleração e prever a profundidade de carbonatação isto é, calcular quanto tempo seria necessário para atingir tal profundidade na realidade.

2.8.2 - Ensaio acelerado

Para avaliar a resistência à carbonatação do betão armado são tradicionalmente usados ensaios de carbonatação acelerada, uma vez que a carbonatação em condições naturais é um fenómeno bastante lento [57]. Os ensaios acelerados, geralmente conduzidos em câmaras de carbonatação onde é possível controlar as condições de exposição, simulam as condições mais propícias para o desenvolvimento das reações de carbonatação, com intensidade superior à esperada em condições normais de serviço [55]. Desta forma, é possível obter uma previsão acerca da durabilidade do material ensaiado, sem ter que aguardar pelos resultados de ensaio de longa duração em atmosferas naturais.

Os ensaios de carbonatação em laboratório utilizam câmaras pré-condicionadas com atmosfera rica em dióxido de carbono, cujas concentrações podem variar entre 1 a 100 %. Este facto

denota a falta de padronização deste tipo de ensaios o que dificulta a comparação entre diferentes estudos [58].

Pesquisas revelam que elevadas concentrações de CO₂ em câmaras pré-condicionadas modificam a microestrutura do betão, especialmente a dos silicatos. Nesse sentido, Castellote *et al.* desenvolveram um trabalho onde comprovaram que teores de concentração de CO₂ acima de 3 % modificam a estrutura dos silicatos e, por conseguinte, a microestrutura dos compostos hidratados da pasta do cimento [59].

O controlo das demais variáveis que ocorrem em condições naturais, nomeadamente a temperatura e humidade relativa, e a curta duração são vantagens indiscutíveis associadas ao uso deste tipo de ensaios.

Através de ensaios acelerados é possível obter o coeficiente de carbonatação (k) mais rapidamente, e assim analisar a evolução da carbonatação ao longo da vida útil do betão. No entanto, deve ter-se cuidado na extrapolação de resultados dos ensaios acelerados para as condições reais porque as elevadas concentrações de CO₂ utilizadas podem distorcer o fenómeno [30].

2.9 - Carbonatação do betão em condições gelo-degelo

A crescente preocupação com a durabilidade das estruturas tem originado o desenvolvimento de vários estudos no sentido de conhecer o desempenho dos materiais, quando sujeitos a determinados agentes de degradação, e garantir um aumento do seu tempo de vida útil.

No que diz respeito às estruturas de betão, a durabilidade é condicionada pelo ambiente em que se encontram inseridas e pela forma como interagem com ele. Uma estrutura pode ser durável num determinado ambiente e noutro não, sendo por isso necessário especificar a durabilidade em função do ambiente a que se destina a ser exposta.

Neville (citado por Castro Gomes e Ferreira) refere que um dos principais fatores que determina a durabilidade do betão é a sua permeabilidade. Por sua vez, a permeabilidade é determinada pela natureza e distribuição dos poros da argamassa de cimento que, no caso de ser pouco resistente à penetração de agentes agressivos, pode colocar em causa a durabilidade do betão [60].

2.9.1 - Ciclos gelo-degelo

A utilização do betão em climas onde a ação de ciclos gelo-degelo está presente tem levado à investigação deste fenómeno, no sentido de assegurar a durabilidade de estruturas de betão quando sujeitas a baixas temperaturas. O mecanismo de deterioração do gelo-degelo inicia-se quando o betão se encontra saturado, com cerca de 91 % dos poros preenchidos com água. Na presença de baixas temperaturas a água congela, devido à inexistência de espaços vazios no betão, passando a ocupar um volume cerca de 9 % superior ao inicial. Este aumento de volume proporciona a formação de tensões expansivas no seio do betão que, com o incremento do número de ciclos, levam à sua fissuração. Assim, a suscetibilidade do betão à ação gelo-degelo depende da quantidade de água na pasta de cimento e das tensões geradas no interior do betão quando a água congela. Ciclos repetitivos gelo-degelo, especialmente se as soluções dos poros contiverem químicos de degelo, provocam a degradação do betão causando danos superficiais e estruturais internos [60].

De forma a minimizar o efeito dos ciclos de gelo-degelo é costume recorrer-se à introdução de ar no interior do betão, aquando da sua produção. Geram-se, assim, poros artificiais constituídos por pequenas bolhas de ar, que não comunicam entre si, que proporcionam um alívio da pressão de água interna durante o processo de congelamento. O CEN (citado por Costa, M.) recomenda a introdução de um volume de ar representando, pelo menos, 4 % do volume total do betão [61].

São vários os fatores que contribuem para a obtenção de um betão com características resistentes ao gelo. A relação água/cimento provoca um grande efeito no volume dos poros do betão, determinando a sua permeabilidade e aptidão para absorver a água que congela. Assim, quanto menor for o valor da relação água/cimento maior é a resistência do betão, menor a sua permeabilidade e maior a sua durabilidade. A taxa de arrefecimento e o grau de saturação do betão são também fatores importantes na resistência ao gelo. Quanto mais lenta for a taxa de arrefecimento do betão menor será a sua degradação e quanto menor for o grau de saturação menores serão os danos. Segundo Fagerlund (citado por Costa) o grau de saturação crítico é de 80 %. Por fim, resistência mecânica e permeabilidade dos agregados do betão também desempenham um papel importante na durabilidade do betão quando sujeito a este tipo de agentes [61].

Não existem normas europeias para determinar a resistência do betão a ciclos gelo-degelo. Existem normas específicas para peças pré-fabricadas de betão e recomendações para os procedimentos de ensaio de determinação da resistência do betão à ação de ciclos gelo-degelo em duas condições específicas, gelo-degelo dentro de água ou gelo ao ar livre e degelo em água [60].

De forma a avaliar, em laboratório, o comportamento de corpos de prova em betão a variações climatéricas são geralmente realizados ensaios gelo-degelo, que se caracterizaram como ensaios de envelhecimento acelerado. A simulação deste processo pode ser feita recorrendo a câmaras frigoríficas, onde o material é submetido a temperaturas negativas.

2.9.2 - Ação da carbonatação e ciclos gelo-degelo: casos de estudo

Atualmente, a crescente necessidade em adquirir um melhor conhecimento acerca da degradação do betão quando sujeito a múltiplos mecanismos de deterioração proporcionou o desenvolvimento de várias pesquisas.

As estruturas de betão estão, usualmente, sujeitas à ação de ciclos gelo-degelo e carbonatação. Estudos relativos à influência de cada um destes fatores na durabilidade das estruturas de betão têm permitido deduzir algumas conclusões e equações empíricas com vista à sua aplicação e verificação em projetos de construção. No entanto, a maioria das pesquisas aparentam ser incompletas e insuficientes, havendo a necessidade de clarificar a influência da interação entre estes dois mecanismos na vida útil das estruturas [62].

Na Finlândia foi desenvolvido, ao longo de três anos, um projeto de investigação com o objetivo de avaliar a interação entre mecanismos de deterioração na vida útil de estruturas de betão inseridas em ambientes muito frios. Os estudos da durabilidade do betão dividiram-se em ensaios de campo e ensaios laboratoriais [63].

Os ensaios de campo decorreram em três locais distintos, sob condições ambientais reais, em que dois deles se destinavam à avaliação do efeito combinado entre ciclos de gelo-degelo e carbonatação, e o restante à análise da ação combinada entre ciclos gelo-degelo, carbonatação e penetração de cloretos.

Os ensaios laboratoriais foram desenvolvidos com o objetivo de compreender a forma como os danos internos no betão, provocados por ciclos de gelo-degelo, afetam a carbonatação. As amostras de betão foram então submetidas, durante 56 dias, a um ambiente com humidade relativa de 60 %, temperatura de 20 °C e uma concentração de 1 % de CO₂. Os ciclos de gelo-degelo foram selecionados de forma a que o grau de deterioração interna pretendido para cada amostra fosse alcançado. Após todos os testes experimentais concluiu-se que, à medida que a deterioração por ciclos de gelo-degelo aumenta, a profundidade de carbonatação também aumenta [63].

Numa outra investigação realizada por Niu *et al.* [62] submeteram-se dois grupos de corpos de prova cúbicos à ação combinada de ciclos gelo-degelo e carbonatação. O primeiro grupo sofreu primeiramente a ação dos ciclos gelo-degelo e só depois experimentou os efeitos de carbonatação. O segundo grupo esteve exposto a carbonatação e só depois experimentou os

ciclos gelo-degelo. Ambos os grupos foram submetidos a 50 ciclos de gelo-degelo e 7 dias de carbonatação, perfazendo um total de 15 dias.

Os corpos de prova em questão foram moldados com cimento Portland 42,5R, com 3,4 % de finos, e possuíam cerca de 30 % de cinza volante. Antes do ensaio foram conservados em ambiente com umidade relativa de 90 % e temperatura de 20 °C durante 30 dias e, de seguida, colocados ao ambiente natural até atingirem idade de 90 dias. Antes do ensaio gelo-degelo, as amostras foram colocadas em água durante 4 dias de forma a atingirem o seu estado de saturação. As amostras destinadas ao ensaio acelerado de carbonatação foram previamente secas ao natural durante 2 dias e em estufa durante 1 dia, repetindo-se este processo durante 7 dias.

Após a análise dos resultados obtidos, os autores concluíram que os danos causados pela interação dos efeitos de ciclos gelo-degelo e carbonatação no betão são muito mais severos do que os danos que o efeito único de cada um deles poderia trazer. Concluíram ainda que após a exposição ao ambiente de carbonatação, os danos no betão provocados por ciclos de gelo-degelo aumentam e que a relação água/cimento será tanto maior quanto maior for o número de ciclos realizados.

Capítulo 3 - Desenvolvimento de um dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação

3.1 - Enquadramento

Como já abordado no capítulo de revisão bibliográfica referente à carbonatação, os ensaios acelerados são vantajosos em relação aos ensaios naturais pela sua curta duração e pela facilidade de controlo de variáveis como a temperatura, a humidade relativa e a concentração de CO₂. Desta forma, num curto espaço de tempo é possível determinar a influência de um determinado ambiente no período de vida útil de uma estrutura em betão armado. A falta de padronização de procedimentos para este tipo de ensaio dificulta a análise dos resultados obtidos, uma vez que cada autor adota o seu próprio procedimento de ensaio.

Neste contexto, foi desenvolvido um dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação com o objetivo de submeter corpos de prova a concentrações bastante elevadas de CO₂, impossíveis de obter em condições naturais. Através da conceção deste dispositivo é possível avaliar o efeito da carbonatação na durabilidade de corpos de prova em betão, inseridos em ambientes com humidade relativa e temperatura controladas. Contudo, a extrapolação de resultados obtidos em laboratório para as condições reais tem de ser realizada com algum cuidado porque não existe na literatura um consenso relativo à forma como os resultados devem ser relacionados.

Neste capítulo são apresentados os principais componentes do dispositivo e todo o processo de montagem do mesmo. É realizada uma descrição pormenorizada de todo o ensaio, desde a criação do ambiente pretendido até ao modo de funcionamento do dispositivo. Por fim, efetua-se uma abordagem aos testes de funcionamento realizados ao dispositivo.

3.2 - Principais constituintes do dispositivo

O dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação consiste na incorporação de vários elementos, em que cada um desempenha uma função específica. A realização do ensaio acelerado de carbonatação só é possível se todos os elementos estiverem funcionais e devidamente interligados. De seguida serão apresentados todos os elementos constituintes do dispositivo, bem como as respetivas funcionalidades.

3.2.1 - Caixa estanque

A caixa estanque, representada na Figura 3.1, é o principal constituinte do dispositivo, sendo o local onde efetivamente decorre o ensaio acelerado de carbonatação. Este constituinte destina-se a executar a função de câmara de carbonatação, pelo que deve garantir-se que se encontra hermeticamente fechado de forma a impossibilitar trocas gasosas entre o seu interior e o exterior.

Na tampa da caixa, Figura 3.2, encontram-se todas as ligações necessárias para que a transferência de gás entre o seu interior e os outros componentes do dispositivo seja possível. A base da caixa destina-se à criação do ambiente pretendido e é onde se coloca o corpo de prova, assente numa base metálica perfurada, destinado ao ensaio de carbonatação.



Figura 3.1 - Caixa estanque



Figura 3.2 - Tampa da caixa estanque

3.2.2 - Botija de CO₂

O fornecimento de CO₂ para o interior da câmara de carbonatação é realizado através de uma botija de CO₂ comprimido, conforme a Figura 3.3, ajustada através de um manómetro. O fluxo de gás entra na câmara, com um caudal mínimo de 5 l/min, sempre que a concentração de CO₂ no seu interior for inferior à desejada para a realização do ensaio.



Figura 3.3 - Botija e manómetro regulador de fluxo de CO₂

3.2.3 - KIT de fluxo de CO₂

O KIT de fluxo de CO₂, Figura 3.4, é constituído por um retentor de partículas, um sensor de CO₂ e uma bomba de ar. O sensor permite a leitura instantânea da concentração de CO₂ existente no interior da câmara de carbonatação e envia esses dados para um *software* desenvolvido para o efeito. A bomba de ar permite a circulação constante de CO₂ ao longo de todo o circuito.

Para um maior conforto sonoro e uma maior segurança do material, os constituintes do KIT de fluxo de CO₂ foram inseridos no interior de uma pequena caixa em PVC, completamente vedada, e envolvidos num material esponjoso.

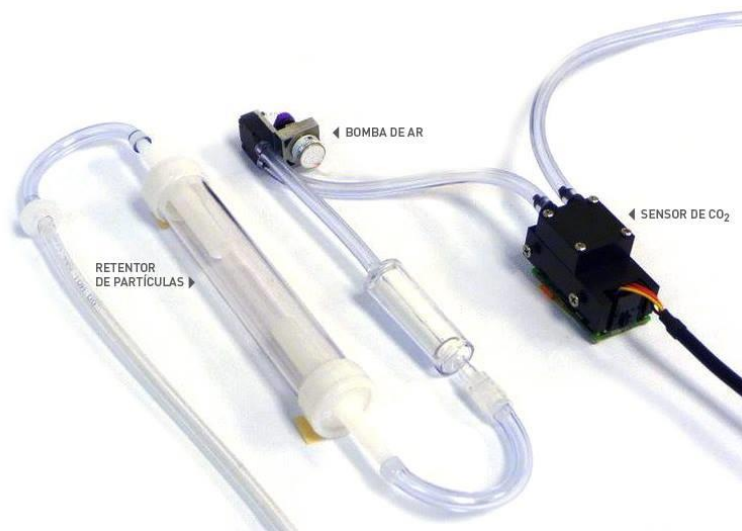


Figura 3.4 - KIT de fluxo de CO₂ [64] (adaptado)

3.2.4 - Software

O *software* desenvolvido permite o controlo automático da introdução de CO₂ na câmara de carbonatação e a leitura, em tempo real, do teor de gás existente no seu interior. Através do *software*, Figura 3.5, é possível obter informações relativas ao teor máximo e mínimo de CO₂ durante o ensaio, ao teor de CO₂ instantâneo e visualizar graficamente a concentração do gás em função do tempo.

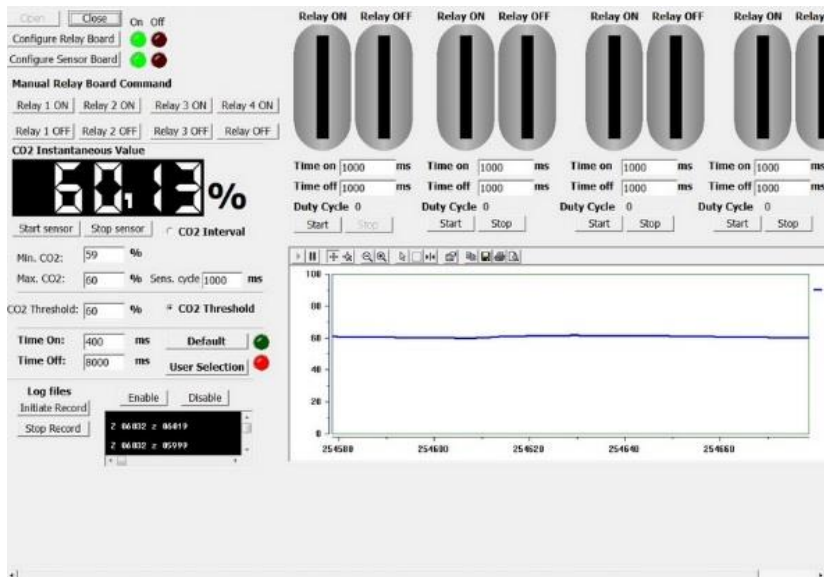


Figura 3.5 - Software

3.2.5 - Electroválvula

A electroválvula, Figura 3.6, encontra-se instalada na ligação entre o cilindro de CO₂ e a câmara de carbonatação, sendo a sua função de permitir ou inibir a passagem do fluxo de CO₂. Sempre que o sensor efetua uma leitura do teor de CO₂ inferior ao pretendido a electroválvula abre, permitindo a passagem do gás ao interior da câmara, e de seguida fecha, inibindo a passagem do mesmo. Os tempos de abertura e fecho da electroválvula são definidos no *software* pelo utilizador.



Figura 3.6 - Electroválvula

3.2.6 - Sistema Arduíno

O sistema Arduíno, Figura 3.7, recebe as informações provenientes do *software* relativas à concentração de CO₂ no interior da câmara. Caso a percentagem de gás seja inferior à requerida, é enviado um comando à electroválvula para que esta se abra.

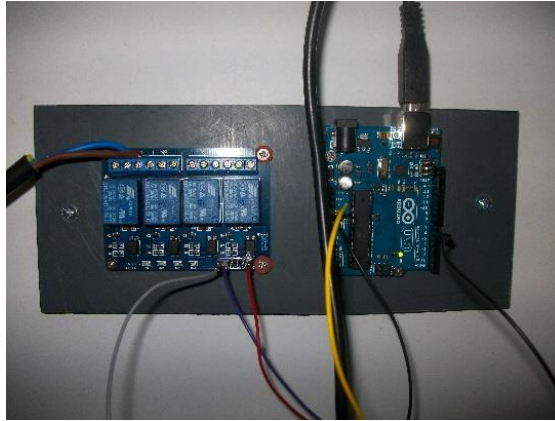


Figura 3.7 - Sistema Arduino

3.3 - Montagem do dispositivo

A montagem do dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação foi efetuada por várias etapas que são apresentadas de seguida.

- 1) Montagem do *KIT* de fluxo de CO_2 :
 - Ligação do retentor de partículas à bomba de ar;
 - Ligação da bomba de ar ao sensor de CO_2 ;
- 2) Ligação entre a botija de CO_2 e a electroválvula e desta à câmara de carbonatação, de forma a garantir o abastecimento de CO_2 no seu interior.
- 3) Ligação entre a câmara de carbonatação e o exterior, garantindo a expulsão do gás em excesso no interior da câmara. Instalação de uma válvula de sentido único nesta ligação com o objetivo de impedir a contaminação do ambiente interior da câmara de carbonatação pelo ambiente exterior.
- 4) Ligação da câmara de carbonatação ao *KIT* de fluxo de CO_2 , garantindo a extração do CO_2 do interior da câmara e a sua passagem pelo *KIT*.
- 5) Ligação do *KIT* de fluxo de CO_2 à câmara de carbonatação, garantindo a reposição de CO_2 no interior da câmara.
- 6) Conexão do sensor de CO_2 e da bomba de ar ao computador através de uma ligação USB.
- 7) Conexão do sistema arduino ao computador, através de ligação USB, e ligação à electroválvula.

As ligações descritas nos pontos 1), 4) e 5) foram conseguidas a partir de tubos maleáveis com 6 mm de diâmetro. As ligações descritas em 2) e 3) foram desenvolvidas através de tubos com 8 mm de diâmetro.

3.4 - Criação das condições de humidade relativa

Para que o ensaio acelerado de carbonatação ocorra na perfeição é necessário que a humidade relativa no interior da câmara se encontre em equilíbrio com a humidade relativa dos corpos de prova a ensaiar, de forma a que estes não percam humidade para o meio e afetem a velocidade do processo.

A humidade relativa no interior da câmara de carbonatação é conseguida através de sais em que cada um deles, em solução aquosa saturada, confere ao ambiente um determinado teor de humidade. No Quadro 3.1 são apresentados os sais frequentemente utilizados e as respetivas humidades relativas produzidas. A ação destes sais é muito rápida e eficiente, uma vez que a humidade produzida é muito aproximada ao valor fornecido pelo fabricante.

No presente estudo, os sais são inseridos em pequenos recipientes e colocados na base da câmara de carbonatação. Para verificar se a humidade relativa no interior da câmara se encontra dentro do intervalo pretendido deve ser efetuada uma frequente monitorização. Para tal, recorre-se a um sensor de humidade e temperatura, o higrómetro. Se o valor registado pelo instrumento for inferior ao desejado, coloca-se um recipiente com água na base da câmara de forma a aumentar a humidade. Se o valor for superior ao desejado, coloca-se uma maior quantidade de sal no interior da câmara.

Quadro 3.1 - Humidade relativa produzida através de solução aquosa saturada [65] (adaptado)

Solução Aquosa Saturada		Humidade Relativa da Solução a 20 °C [%]
Fosfato Dissódico	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \times 12 \text{ H}_2\text{O}$	95
Carbonato de Sódio	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10 \text{ H}_2\text{O}$	92
Sulfato de Zinco	$\text{ZnSO}_4 \times 7 \text{ H}_2\text{O}$	90
Cloreto de Potássio	KCl	86
Sulfato de Amónio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	80
Cloreto de Sódio	NaCl	76
Nitrato de Sódio	NaNO_2	65
Nitrato de Amónio	NH_4NO_3	63
Nitrato de Cálcio	$\text{Ca} (\text{NO}_3)_2 \times 4 \text{ H}_2\text{O}$	55
Carbonato de Potássio	K_2CO_3	45
Nitrato de Zinco	$\text{Zn} (\text{NO}_3)_2 \times 6 \text{ H}_2\text{O}$	42
Cloreto de Cálcio	$\text{CaCl} \times 6 \text{ H}_2\text{O}$	32
Cloreto de Lítio	$\text{Li} \times \text{H}_2\text{O}$	15

3.5 - Funcionamento do dispositivo

Para que se inicie o ensaio acelerado de carbonatação é necessário configurar o *software*, fixando um valor para o percentual de CO₂ e definindo os tempos de abertura e fecho da electroválvula. Assim, todo o processo decorre automaticamente sem que seja necessário o controlo sistemático do operador.

Depois de configurado, o *software* transmite informações ao sistema arduino que, por sua vez, envia instruções à electroválvula para que esta se encontre aberta e fechada durante os períodos de tempo definidos. Sempre que a electroválvula abre, o circuito é então iniciado e ocorre um fornecimento de gás desde a botija de CO₂ até à câmara de carbonatação. O excesso de gás no interior da câmara é imediatamente expelido para o exterior, sob pressão, através de uma ligação na qual se encontra inserida uma válvula de sentido único com o objetivo de impedir a contaminação do ambiente interior pelo exterior.

O CO₂ existente dentro da câmara é entretanto enviado para o *KIT* de fluxo de CO₂, passando pelo retentor de partículas, bomba de ar e sensor de CO₂. Posteriormente, o gás é de novo encaminhado para o interior da câmara de carbonatação. A leitura efetuada pelo sensor é emitida para o *software*, permitindo ao utilizador adquirir informação acerca do teor instantâneo de CO₂ no interior da câmara. Se o teor de CO₂ exibido no *software* for inferior ao requerido, é iniciado um novo ciclo que só termina quando for registado um teor de CO₂ igual ou superior ao pretendido. Durante o fornecimento de CO₂ a electroválvula abre e fecha durante os tempos definidos.

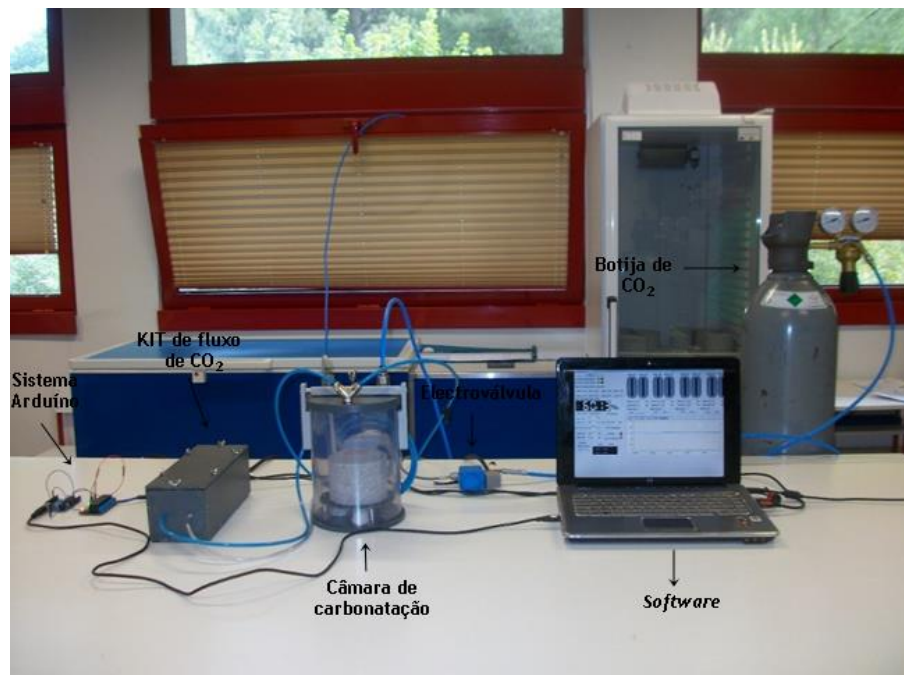


Figura 3.8 - Dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação (adaptado)

Na Figura 3.9 pode visualizar-se um esquema simplificado do modo de funcionamento do dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação.

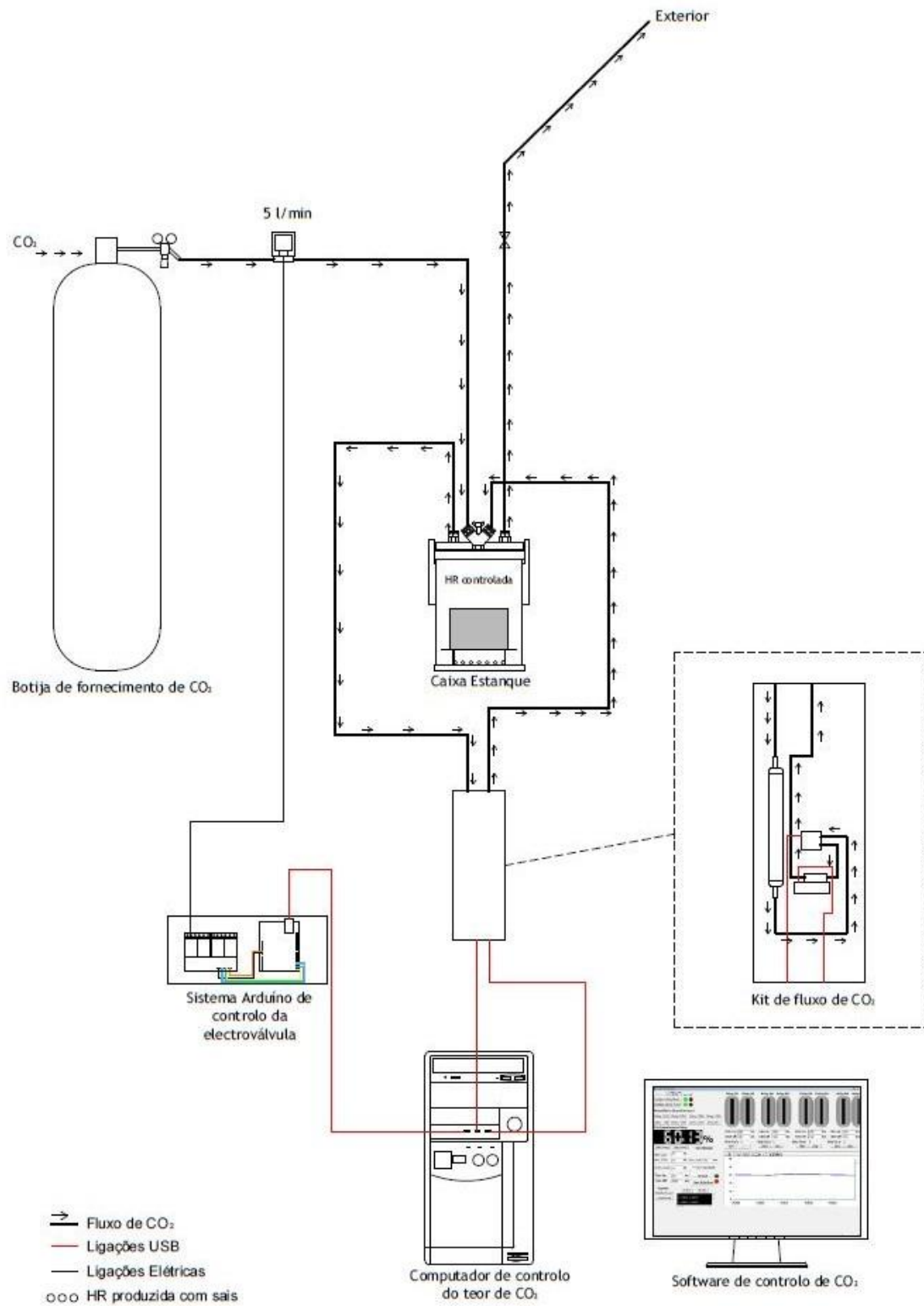


Figura 3.9 - Esquema do dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação

Através da Figura 3.9 pode constatar-se o que foi referido anteriormente acerca do dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação. Na tampa da caixa estanque, que exerce a função de câmara de carbonatação, existe uma ligação à botija de CO₂ e outra para o exterior do laboratório. Nesta última ligação encontra-se inserida uma válvula de sentido único com o intuito de barrar trocas gasosas entre ambientes. Também é possível verificar a existência de uma ligação do interior da câmara para o KIT de fluxo de CO₂ e deste para a câmara. Já no interior do KIT pode observar-se todo o percurso do gás carbónico. O sensor de CO₂, bomba de ar e sistema arduino estão conectados ao computador. A electroválvula encontra-se ligada ao sistema arduino de forma a controlar a entrada de fluxo de CO₂ no interior da câmara.

3.6 - Testes de funcionamento

Depois da montagem de todo o dispositivo procedeu-se à realização de testes ao seu funcionamento, de forma a garantir total eficácia na realização do ensaio acelerado de carbonatação.

Os testes de funcionamento ao dispositivo foram desenvolvidos em duas fases. Numa primeira fase foram realizados testes numa versão protótipo do *software*, em que o utilizador apenas tinha a possibilidade de fixar o teor de CO₂ pretendido para o ensaio. Devido à obtenção de resultados insatisfatórios nestas condições, sentiu-se necessidade de criar uma nova versão do *software* que também permitisse ao utilizador cronometrar os tempos de abertura e fecho da electroválvula, garantindo o controlo da entrada do fluxo de CO₂ dentro da câmara de carbonatação.

Numa fase inicial de testes, sempre que o sensor registava um teor de CO₂ inferior ao previamente fixado no *software* ocorria um fornecimento de gás desde a botija de CO₂ até à câmara de carbonatação, com um caudal mínimo de 5 l/min, que só terminava quando era registado um valor igual ou superior ao pretendido. Desta forma constatou-se que, no interior da câmara de carbonatação, os valores referentes ao teor de CO₂ registados pelo sensor eram cerca de 10 % superiores ao requerido.

Concluiu-se que o excesso de CO₂ se devia ao facto de o comando transmitido pelo *software* à electroválvula, para a sua abertura ou fecho, depender das leituras efetuadas pelo sensor e estas só ocorrerem de segundo a segundo. Assim, no intervalo entre leituras era introduzido na câmara de carbonatação um percentual de CO₂ superior ao necessário para atingir o valor inicialmente fixado no *software*.

No sentido de solucionar este problema procurou-se condicionar o tempo de abertura da electroválvula, garantindo que esta não estivesse continuamente aberta durante o fornecimento de CO₂. Pretendia-se, assim, que durante o fornecimento de CO₂ a electroválvula

abrisse e fechasse sucessivamente, durante períodos de tempo definidos, até a concentração de gás na câmara ser a desejada. Para tal, foi desenvolvida uma nova versão do *software* onde foi adicionada uma opção através da qual o utilizador pode definir o tempo de abertura e fecho da electroválvula.

Posteriormente, seguiu-se uma segunda fase de testes no sentido de acertar os tempos de abertura e fecho da electroválvula. Os tempos anteriormente referidos fizeram-se variar de forma a obter uma diferença entre o teor de CO₂ introduzido e o pretendido igual ou inferior a 2 %, valor este já considerado como um erro admissível.

3.6.1 - *Software* inicial

Através da Figura 3.10 é possível visualizar a *interface* do *software* inicial e identificar o local, no interior do retângulo a vermelho, destinado à fixação do teor de CO₂ pretendido pelo utilizador. Através do *software* é possível ter conhecimento do valor instantâneo de CO₂ no interior da câmara e obter um gráfico da concentração de gás ao longo do tempo.

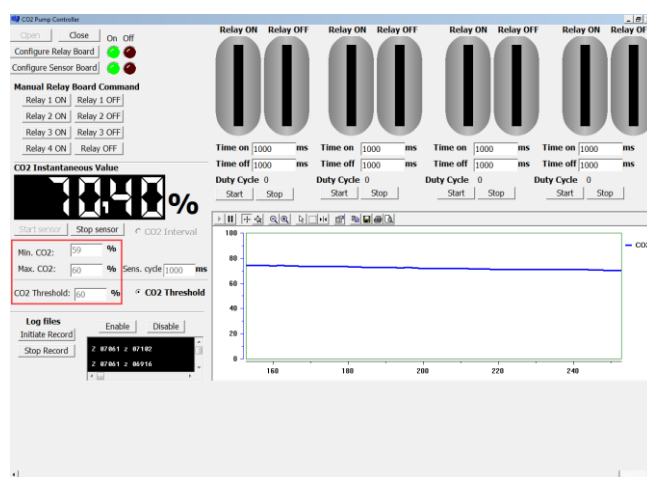


Figura 3.10 - Interface do *software* inicial (adaptado)

O gráfico da Figura 3.11, construído a partir dos resultados fornecidos pelo *software* inicial, representa a concentração de CO₂ ao longo do tempo. A partir deste é possível aferir que a concentração no interior da câmara é cerca de 10 % superior ao percentual de CO₂ inicialmente definido, 60 %.

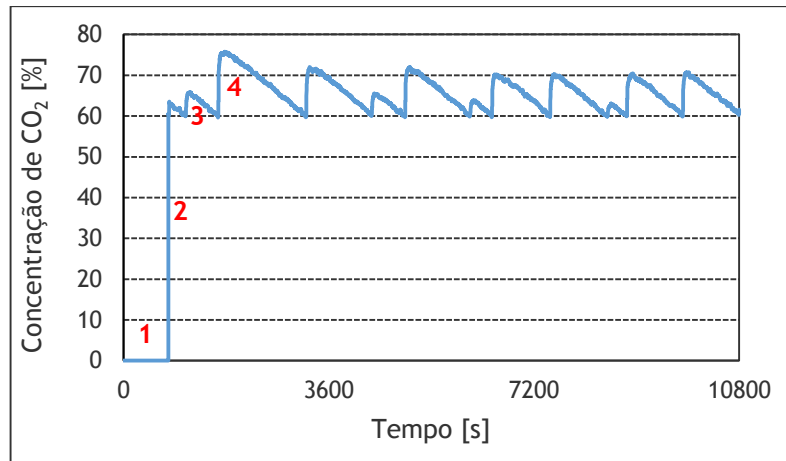


Figura 3.11 - Variação da concentração de CO₂ ao longo de 3 horas (*software* inicial)

Através do gráfico podem ser observados vários patamares numerados correspondentes à variação da concentração de CO₂ ao longo do tempo, em que:

1. Concentração inicial de CO₂.
2. Aumento brusco da concentração de CO₂ devido ao fornecimento de gás.
3. Decréscimo da concentração de CO₂ para valores próximos do requerido.
4. Aumento da concentração de CO₂ para valores muito superiores ao requerido.

3.6.2 - *Software* final

Através da Figura 3.12 é possível visualizar a *interface* da versão final do *software* na qual, no interior do retângulo a vermelho, se encontra a opção que permite ao utilizador definir os tempos de abertura e fecho da electroválvula.

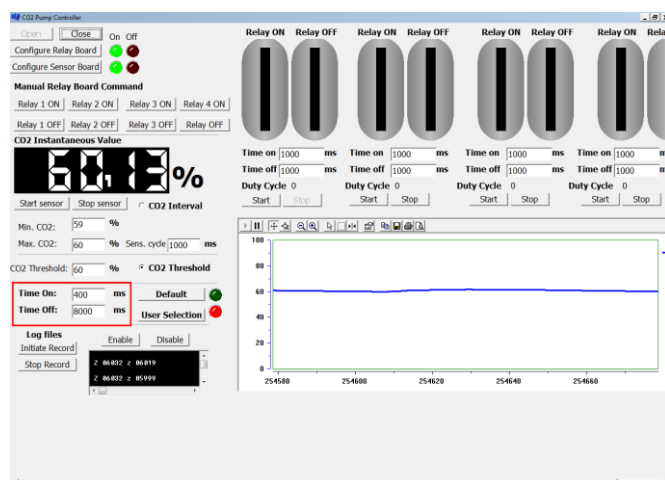


Figura 3.12 - Interface da versão final do *software* (adaptado)

Depois da realização de vários testes, de forma a obter os tempos ideais de abertura e fecho da electroválvula, concluiu-se que 400 ms de abertura e 8000 ms de fecho garantiam uma variação entre o teor de CO₂ introduzido e o pretendido pelo utilizador não excedente a 2 %.

O gráfico da Figura 3.13, construído a partir dos resultados fornecidos pela versão final do *software*, representa a concentração de CO₂ ao longo do tempo. A partir deste é possível aferir que a concentração no interior da câmara se manteve relativamente constante ao longo do tempo.

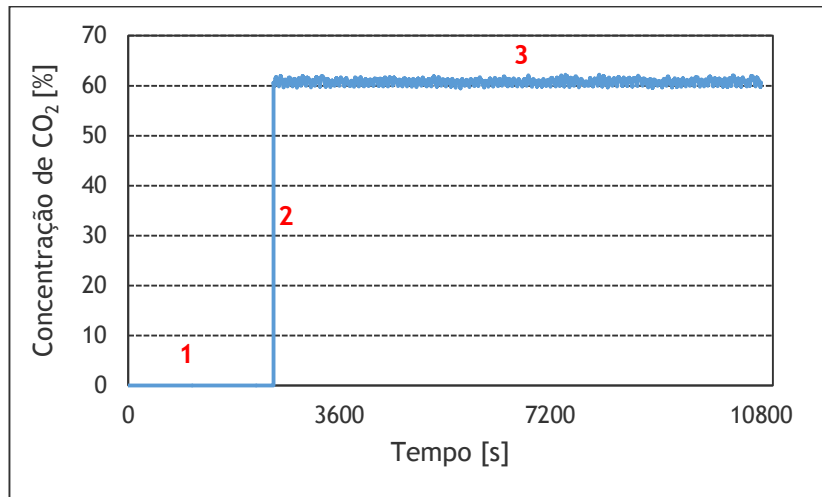


Figura 3.13 - Variação da concentração de CO₂ ao longo de 3 horas (*software* final)

Através do gráfico podem ser observados vários patamares numerados correspondentes à variação da concentração de CO₂ ao longo do tempo, em que:

1. Concentração inicial de CO₂.
2. Aumento brusco da concentração de CO₂ devido ao fornecimento de gás.
3. Permanência da concentração dentro de um intervalo aceitável.

Capítulo 4 - Programa experimental

4.1 - Aspectos gerais

A metodologia adotada para caracterizar e analisar o betão dos corpos de prova recorre a um conjunto de técnicas que se complementam de forma a garantir uma maior fiabilidade na análise final. Na presente dissertação, o betão foi analisado quanto à sua microestrutura e durabilidade, estimando-se o seu real desempenho em situações correntes de aplicação.

Para a caracterização da microestrutura do betão foram realizados ensaios de espectroscopia de raio-X por dispersão de energia (EDX) e porosimetria por intrusão de mercúrio, que permitiram obter informações acerca de determinadas características ou aspectos gerais da microestrutura. Através da espectroscopia de raio-X por dispersão de energia foi possível determinar as quantidades de certas fases presentes no betão e através da porosimetria por intrusão de mercúrio foi possível obter informações relativas à distribuição de poros na pasta de cimento.

De forma a estudar a sua durabilidade, o betão foi submetido ao ensaio de absorção de água por capilaridade e carbonatação. Uma vez que muitas das características de durabilidade de um betão se encontram relacionadas com as suas propriedades mecânicas, foi também analisada a resistência à compressão.

No presente capítulo são descritos todos os procedimentos experimentais necessários, bem como os respetivos equipamentos, para avaliar e caracterizar o betão em estudo de acordo com procedimentos de ensaios normalizados ou estabelecidos em estudos efetuados anteriormente.

4.2 - Especificações do betão

O betão utilizado nos ensaios deste estudo é produzido em central e apresenta as seguintes especificações [66]:

- Classe de resistência - C30/37.
- Classe de abaixamento - S3.
- Classe de exposição ambiental - XC3.
- Dimensão máxima do agregado - D22.
- Classe do teor de cloretos - Cl 0,4.
- Cimento - CEM II/A-L 42,5 R


4.3 - Execução dos corpos de prova

Os corpos prova destinados aos ensaios de seguida apresentados foram caroteados de lajetas com dimensão 50 x 50 x 15 cm. A carotagem foi realizada com o auxílio de uma máquina de corte, conforme a Figura 4.1, designada caroteadora. As carotes extraídas foram cortadas transversalmente, dando origem a corpos de prova cilíndricos com 10 cm de raio e 7,5 cm de altura. No Quadro 4.1 apresenta-se a fotografia de uma carote e a respetiva caracterização do betão.



Figura 4.1 - Extração das carotes

Quadro 4.1 - Fotografia e caracterização da carote

Fotografia da carote	Caracterização da carote (Inspeção visual)
	<p>O betão é constituído por agregados com dimensão máxima na ordem dos 2 cm, contendo alguns vazios de ordem milimétrica. A dispersão dos agregados na mistura é homogénea.</p> <p>Verifica-se uma boa aderência entre os agregados e a argamassa do betão.</p> <p>Observa-se que o volume de poros é elevado.</p>

A carotagem foi realizada de acordo com o recomendado pela RILEM isto é, na direção perpendicular à face de enchimento da lajeta. A extração das carotes foi efetuada a partir de duas lajetas curadas em condições distintas. Uma das lajetas foi curada em condições de laboratório, dentro de uma câmara com temperatura de 17,5 °C e humidade relativa de 85 %, e a outra foi curada em condições naturais, sujeita ao ambiente exterior.

Para os ensaios de absorção de água por capilaridade, verificação de resistência à compressão e carbonatação acelerada foram utilizados corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 7,5 cm de altura. Para os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio e energia dispersiva de raios-X utilizaram-se fragmentos provenientes do esmagamento de corpos de prova sujeitos ao ensaio de resistência à compressão.

4.4 - Pré-condicionamento

O pré-condicionamento é uma etapa bastante importante pois permite dotar os corpos de prova de uma concentração média de humidade, preparando-os para ensaios posteriores. A uniformização da matriz porosa do betão relativamente à distribuição de humidade, garantida por ação do pré-condicionamento, permite uma diminuição na variabilidade dos resultados.

O processo de pré-condicionamento utilizado neste trabalho laboratorial, que consiste numa simplificação do método proposto pelo RILEM 116-PCD [67], foi estudado por Castro Gomes *et al.* [68]. A utilização do método simplificado justifica-se pela redução do tempo de pré-condicionamento e pela obtenção de valores semelhantes em relação ao indicado no RILEM TC 116-PCD.

Na fase de pré-secagem os corpos de prova foram colocados numa estufa a 50 °C durante 24 horas e pesados após esse período de tempo. Posteriormente, foram colocados numa câmara com 75 ± 2 % de humidade relativa e temperatura de 20 ± 2 °C de forma a recuperarem a humidade perdida durante a pré-secagem, até ao equilíbrio de 75 % de humidade relativa.

Para que se reúnam todas as condições para a realização dos ensaios de caracterização do betão é necessário que o pré-condicionamento seja de, pelo menos, duas semanas.

4.5 - Ensaio de caracterização do betão

4.5.1 - Absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade do betão obedeceu à Especificação do LNEC E 393-1993 - Betões: Determinação da absorção de água por capilaridade [69]. Os coeficientes de capilaridade foram determinados de acordo com a metodologia presente na Norma Francesa NF B 10-502 [70] e os coeficientes de absorção de acordo com o estipulado na Norma Alemã DIN 52617 [70].

O coeficiente de capilaridade, C, segundo a NF B 10-502 é determinado pela Equação 4.1 [70].

$$C = \frac{100 \times m_{24h}}{A \times \sqrt{24 \times 60}} \quad (4.1)$$

Onde:

C - coeficiente de capilaridade, em $\text{g.cm}^{-2}.\text{min}^{-0,5}$.

m_{24h} - aumento de massa do corpo de prova após 24 horas de ensaio, em g.

A - área do corpo de prova em contacto com a lâmina de água, em cm^2 .

O coeficiente de absorção, A_w , segundo a DIN 52617 é dado pela Equação 4.2 [40].

$$A_w = \frac{m_{24h}}{A \times \sqrt{24}} \quad (4.2)$$

Onde:

A_w - coeficiente de absorção, em $\text{Kg.m}^{-2}.\text{h}^{-0,5}$.

m_{24h} - aumento de massa do corpo de prova após 24 horas de ensaio, em Kg.

A - área do corpo de prova em contacto com a lâmina de água, em m^2 .

A realização deste ensaio foi efetuada em duas fases. Numa primeira fase, os corpos de prova foram ensaiados secos sem qualquer tipo de pré-condicionamento. Numa segunda fase, os corpos de prova foram retirados diretamente da câmara de pré-condicionamento com $75 \pm 2 \%$ de humidade relativa.

4.5.1.1 - Sem pré-condicionamento

O ensaio foi realizado em 8 corpos de prova com condições de cura distintas, 4 curados em condições naturais e 4 curados em laboratório. Quanto maior o número de corpos de prova para a mesma situação, maior será a confiança nos resultados experimentais e maior a sensibilidade

para a análise dos mesmos. Desta forma, a deteção de eventuais erros ou discrepâncias será facilitada.

Inicialmente os corpos de prova foram secos em estufa ventilada, Figura 4.2, a uma temperatura de 105-110 °C durante cerca de 24 horas. Quando estes atingiram massa constante, determinou-se a sua massa seca.



Figura 4.2 - Corpos de prova no interior da estufa ventilada

Os corpos de prova foram colocados num tabuleiro com água, assentes em suportes sobrelevados e parcialmente imersos em água. A altura da lâmina de água permaneceu 5 mm acima da face inferior dos mesmos, como mostra a Figura 4.3. O tabuleiro foi coberto de forma a evitar a evaporação da água.

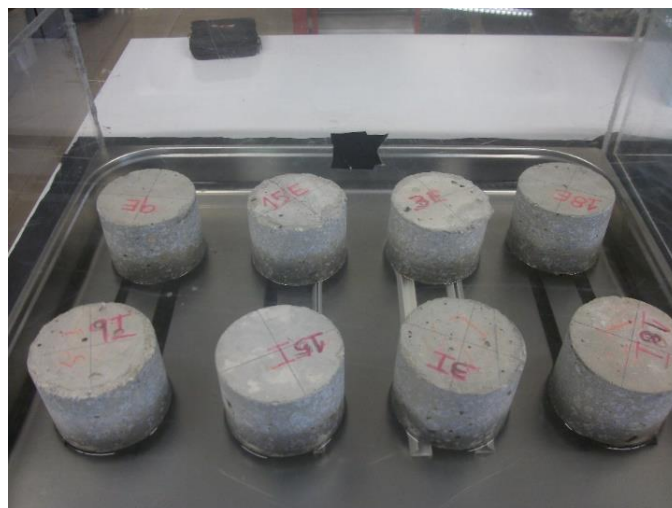


Figura 4.3 - Ensaio de absorção de água por capilaridade

Após 3, 6, 24 e 72 horas de contacto com a água foram registadas as massas dos corpos de prova e contabilizado o aumento de massa em função do tempo de contacto. Em cada medição houve

o cuidado de limpar a superfície do corpo de prova com um pano húmido e verificar se o nível da água se mantinha constante [69].

4.5.1.2 - Com pré-condicionamento

O ensaio foi realizado em 2 corpos de prova com condições de cura distintas, um curado em condições naturais e outro curado em laboratório.

Os corpos de prova destinados ao ensaio foram retirados de uma atmosfera pré-condicionada de 75 ± 2 % de HR e 20 ± 1 °C, procedendo-se à pesagem direta dos mesmos.

De seguida, à semelhança do descrito no ponto 4.5.1.1, foram colocados num tabuleiro com água até esta atingir cerca de 5 mm acima das suas faces inferiores. Após 3, 6, 24 e 72 horas de contacto com a água foram registadas as suas massas, tendo-se sempre o cuidado em limpar a superfície húmida e em manter a altura da água constante.

As condições de humidade relativa foram mantidas constantes ao longo de todo o ensaio.

4.5.2 - Resistência à compressão

O ensaio de verificação da resistência à compressão foi realizado segundo o procedimento descrito na Especificação do LNEC E 226 - Betão. Ensaio de Compressão [71].

Este ensaio tem como objetivo determinar a tensão de rotura de corpos de prova cilíndricos aos 28 dias de cura [71]. O ensaio foi realizado em 8 corpos de prova, dos quais 4 foram curados em laboratório e os restantes 4 em condições naturais.

O ensaio foi realizado numa prensa, conforme mostra a Figura 4.4, que aplica um carregamento com taxa de acréscimo de 0,3 KN/s e regista o valor da tensão de rotura, em MPa. Os corpos de prova foram colocados no prato inferior da prensa, centrados, garantindo a perpendicularidade das forças de compressão aplicadas relativamente às faces do corpo de prova em contato com o molde. As forças de compressão foram aplicadas de forma gradual com uma velocidade de 13,5 KN/s.

Neste ensaio não foi verificado qualquer tipo de pré-condicionamento dos corpos de prova.



Figura 4.4 - Prensa utilizada para determinar a resistência à compressão

4.5.3 - Porosimetria por intrusão de mercúrio

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi concebido para determinar o volume e a distribuição do diâmetro médio dos poros na pasta de cimento Portland. Este estudo foi elaborado com o auxílio do instrumento “Micromeritics AutoPore IV 9500” do Laboratório de Durabilidade da Universidade da Beira Interior, como mostra a Figura 4.5. Este instrumento permite a determinação de volumes de vazios correspondentes a poros médios entre 6 e 0,01 μm , e a variação da pressão desde valores de pressão atmosférica até 33000 psi (228 MPa).



Figura 4.5 - Microporosímetro de mercúrio

Na técnica de porosimetria, o volume de mercúrio que penetra um sólido é medido em função da pressão aplicada. A relação entre a pressão aplicada e o menor diâmetro dos poros com mercúrio introduzido é baseada na lei capilar que rege a penetração de líquidos em pequenos poros. Geralmente os dados da penetração de mercúrio são analisados usando a equação de Washburn, Equação 4.3, que relaciona o raio dos poros (assumidos como cilíndricos) e a pressão imposta [72].

$$P = \frac{2 \times \Psi \times \cos \theta}{r} \quad (4.3)$$

Onde:

Ψ - Tensão superficial do mercúrio.

θ - Ângulo de contacto com a amostra.

r - Raio do capilar.

A tensão superficial do mercúrio e o ângulo de contacto com a amostra assumem valores correntes de 0,485 N/m e 140 °, respetivamente.

Antes de ser dar início ao ensaio com microporosímetro de mercúrio é necessário montar o penetrómetro no tubo de ensaio apropriado e, posteriormente, colocar a amostra no interior da sua câmara. De seguida, utilizando um *software* de computador, o microporosímetro pode ser iniciado para executar a análise de baixas e altas pressões, sendo a de baixas pressões a primeira a ser efetuada.

No início da análise de baixas pressões, o ar é totalmente removido do interior da amostra para que seja criado um vácuo. Segue-se assim a fase de intrusão em que o mercúrio tenta preencher o interior da câmara do penetrómetro e a estrutura porosa da amostra, através de movimentos em baixa pressão. De seguida surge a fase de extrusão, caracterizada pela remoção de todo o mercúrio do interior da estrutura porosa e penetrómetro. Para que se inicie a análise de altas pressões é necessário mudar o tudo de ensaio.

O procedimento adotado para a análise de alta pressão é idêntico ao de baixa pressão, pelo que depende de menos tempo para ser realizado. No final do ensaio, o computador calcula os volumes de intrusão e extrusão cumulativos de mercúrio de acordo com o diâmetro dos poros e a pressão utilizada. Os dados resultantes são apresentados graficamente e calculados pela equação de Washburn [72].

As amostras para o ensaio foram extraídas, na forma de fragmentos, da argamassa de corpos de prova em betão. A extração foi realizada com auxílio de um martelo. A Figura 4.6 demonstra a extração dos fragmentos e as amostras destinadas ao ensaio.



Figura 4.6 - (a) Extração de fragmentos dos corpos de prova, (b) Amostra para porosimetria por intrusão de mercúrio

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi realizado em amostras não carbonatadas e amostras carbonatadas secas, a fim de se verificar a diferença de porosidade decorrente da carbonatação. Cada tipo de amostras é composto por duas espécimes, uma curada em laboratório e a outra em condições naturais.

4.5.4 - Composição química

A composição química dos corpos de prova foi determinada através de um ensaio EDX realizado num microscópio eletrônico de varrimento, no centro de ótica da Universidade da Beira Interior.

A espectrometria de raio-X por dispersão de energia é uma técnica utilizada para análise elementar ou caracterização química de uma amostra. A técnica consiste na incidência de um feixe de elétrons sobre uma amostra que provoca a excitação dos iões constituintes e dos elétrons mais externos ao átomo. Estes, ao regressarem à sua posição inicial, libertam a energia adquirida e emitem-na no espectro de raio-X em comprimento de onda. O detetor instalado na câmara de vácuo do microscópio eletrônico de varrimento mede a energia associada a esse elétron e, no ponto de incidência do feixe, é possível determinar os elementos químicos presentes naquele local e identificar o mineral observado [73].

As amostras destinadas ao ensaio EDX foram preparadas em forma de pó passante no peneiro #0,075 μm . Foram ensaiadas amostras não carbonatadas e amostras carbonatadas de forma a identificar as alterações provocadas na sua microestrutura pela ocorrência do fenómeno da carbonatação. Cada tipo de amostras é constituído por duas espécimes, uma curada em laboratório e outra em condições naturais.

4.6 - Ensaio acelerado de carbonatação

4.6.1 - Enquadramento teórico

O presente subcapítulo trata a aplicação prática do que foi exposto nos capítulos anteriores, a carbonatação no betão. O principal objetivo do procedimento experimental que a seguir se descreve consiste em avaliar a progressão da frente de carbonatação ao longo do tempo.

Para a realização do ensaio acelerado de carbonatação combinaram-se diferentes teores de CO₂ e humidades relativas no interior do dispositivo de ensaio desenvolvido, descrito no Capítulo 3, de forma a verificar o efeito produzido no betão. Para além de corpos de prova padrão, isentos de qualquer tipo de degradação induzida, foram também submetidos a ensaio corpos de prova degradados pela ação de sucessivos ciclos gelo-degelo com o objetivo de avaliar o efeito da fissuração na propagação da frente de carbonatação.

Para a realização deste ensaio seguiu-se a especificação do LNEC E-391 (1993) “Betões. Determinação da resistência à carbonatação” [74].

4.6.2 - Pré-condicionamento

Antes de se dar início ao ensaio acelerado de carbonatação, os corpos de prova foram sujeitos a um período de pré-condicionamento de forma a adquirirem um teor interno de humidade homogéneo. Os corpos de prova foram distribuídos por quatro ambientes distintos, de acordo com o Quadro 4.2, totalmente selados de forma a não ocorrerem perdas de humidade para o exterior. Os diferentes ambientes foram criados com o auxílio de soluções salinas que determinam a humidade relativa de um determinado meio. A Figura 4.7 representa os quatro ambientes criados através das referidas soluções. Foram assim utilizados Sulfato de Zinco, Cloreto de Sódio, Nitrato de cálcio e Cloreto de Cálcio para produzir humidades relativas de $90 \pm 2 \%$, $75 \pm 2 \%$, $60 \pm 2 \%$ e $32 \pm 2 \%$, respetivamente. A massa dos corpos de prova foi monitorada diariamente, em intervalos de 24 h, até verificar diferença de peso inferior a 0,1 g entre duas pesagens consecutivas. Atingida essa pequena diferença na leitura de massas, a humidade interna do betão encontra-se homogeneizada.

Antes de serem colocados nos respetivos ambientes, os corpos de prova foram pesados totalmente secos (HR = 0 %) e registadas as suas massas. O mesmo procedimento se repetiu antes de se submeterem ao ensaio de carbonatação, com humidade interna em equilíbrio. Constatou-se que após o período de pré-condicionamento, ocorreu um acréscimo na massa de cada corpo de prova. A título de exemplo apresentam-se no Quadro 4.3 os valores das massas de dois corpos de prova de cada ambiente, com condições de cura distintas, antes e após o pré-condicionamento.

Quadro 4.2 - Ambientes criados através de soluções salinas

Solução Salina	Humidade Relativa [%]	Ambiente
Sulfato de Zinco	$90 \pm 2 \%$	A
Cloreto de Sódio	$75 \pm 2 \%$	B
Nitrato de Cálcio	$60 \pm 2 \%$	C
Cloreto de Cálcio	$32 \pm 2 \%$	D

A variância de 2 % no teor de humidade relativa de cada ambiente deve-se a variações térmicas provocadas pelos ciclos dia/noite e por eventuais fugas nos ambientes criados.



Figura 4.7 - Ambientes de pré-condicionamento

Quadro 4.3 - Massa dos corpos de prova antes e após pré-condicionamento

Ambiente	Corpo de Prova	Cura	Massa [g]		Diferença [g]	Variação [%]
			HR = 0 %	HR = 32 ± 2 %		
A	P11_N	Natural	1477,01	1486,77	9,76	0,66
	P10_L	Laboratório	1540,57	1549,79	9,22	0,59
B	P12_N	Natural	1465,63	1472,80	7,17	0,49
	P5_L	Laboratório	1425,85	1433,64	7,79	0,54
C	P9_N	Natural	1488,02	1492,99	4,97	0,33
	P8_L	Laboratório	1504,70	1509,60	4,90	0,32
D	P7_N	Natural	1518,15	1518,67	0,52	0,03
	P6_L	Laboratório	1478,44	1481,19	2,75	0,19

4.6.3 - Procedimento de ensaio

Após o período de pré-condicionamento os corpos de prova foram inseridos na câmara de carbonatação em condições estáveis de humidade, temperatura e concentração de dióxido de carbono. Foram ensaiados 20 corpos de prova de 10 x 7,5 cm (diâmetro x altura), dos quais 8 sofreram precedentemente um período de exposição a ciclos gelo-degelo. O ensaio de cada corpo de prova teve a duração de 8 dias de exposição ao CO₂.

Após cada ensaio, os corpos de prova foram retirados da câmara de carbonatação e rompidos diametralmente para determinação da profundidade de carbonatação. A rotura foi realizada com o auxílio de dois perfis metálicos colocados cuidadosamente no eixo de simetria dos corpos de prova, como mostra a Figura 4.8. Este procedimento evita o esmagamento dos corpos de prova e possibilita uma rotura próxima do eixo da peça. Da rotura resultam duas peças, aproximadamente simétricas, que permitem efetuar um maior número de leituras da profundidade carbonatada.



Figura 4.8 - Rotura do corpo de prova

Após a rotura, a superfície dos corpos de prova foi limpa e aspergida com uma solução de fenolftaleína, a qual indica a frente carbonatada. Após a aspersão, as zonas não carbonatadas do betão adquirem uma tonalidade vermelho-carmim e as zonas carbonatadas permanecem incolor, conforme a Figura 4.9. Depois de aspergida a solução, foram retiradas fotos com uma câmara digital.



Figura 4.9 - Detalhe do corpo de prova após a aspersão de fenolftaleína

Visualmente é possível definir a região vermelho-carmim, correspondente a um pH elevado, e uma região incolor, correspondente a um pH inferior a 9,5. A região incolor, a partir das extremidades do corpo de prova, representa a profundidade carbonatada. Embora a RILEM (1988) CPC-18 [66] indique que a medida da profundidade de carbonatação deve ser obtida 24 horas após a aspersão, optou-se por aguardar apenas 20 minutos uma vez que após esse período a coloração rosa-carmim perde intensidade. A medição da profundidade carbonatada efetuou-se com o auxílio de um paquímetro.

Para a medição da profundidade de carbonatação a especificação do LNEC E 391 [69] recomenda que se adote a seguinte metodologia “No caso de a frente de carbonatação se desenvolver paralelamente à superfície, o resultado é encontrado pelo valor da distância entre a superfície e a linha da frente de carbonatação (d_k). Se a frente de carbonatação não se desenvolver paralelamente à superfície ou apresentar zonas de irregularidade, deve ser medido o valor médio (d_k) e o valor máximo ($d_{k\text{ máx}}$)”. Na Figura 4.10 é possível visualizar os três tipos possíveis de apresentação da frente de carbonatação.

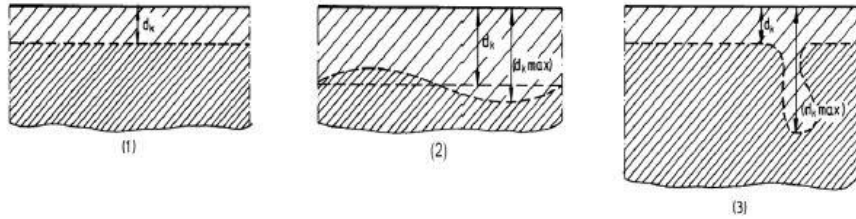


Figura 4.10 - Frente de carbonatação (1) paralelamente à superfície, (2) e (3) com zonas de irregularidade [66]

A totalidade das medições apresenta-se com o aspeto da Figura 4.10 (2). Optou-se por apenas contabilizar d_k uma vez que, apesar das irregularidades apresentadas, foi possível perceber a linha média da frente de carbonatação.

No sentido de obter as medidas da profundidade de carbonatação com um grau de confiança elevado recorreu-se ao *software* AutoCAD da Autodesk. As leituras da profundidade de carbonatação obtidas através do processo analógico, com o auxílio do paquímetro, não apresentam diferenças significativas em relação à medição pelo processo digital. No entanto, através deste último é possível obter uma maior quantidade de medições, o que permite estimar uma profundidade de carbonatação mais próxima da real. Assim, na determinação da profundidade de carbonatação através do *software* AutoCAD seguiu-se o seguinte procedimento:

- Inserir a imagem do corpo de prova fotografado no programa gráfico AutoCAD;
- Escalar a foto de acordo com as dimensões reais do corpo de prova;
- Com recurso a poligonais, delimitar a região carbonatada e o perímetro do corpo de prova, conforme a Figura 4.11;

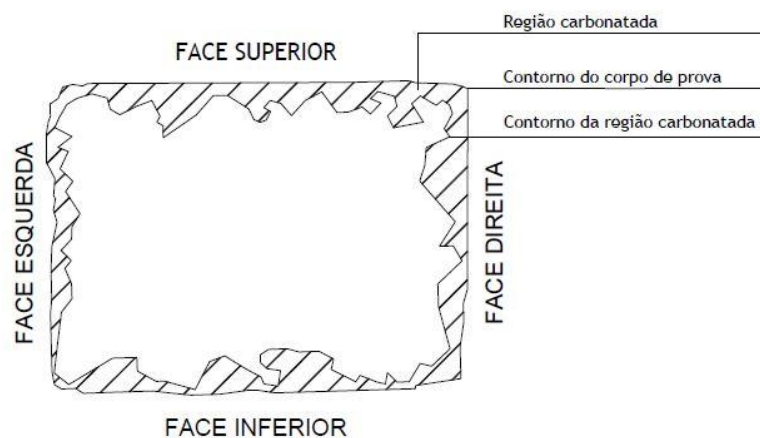


Figura 4.11 - Contorno do corpo de prova e da região carbonatada

- Traçar linhas paralelas, afastadas de 0,5 cm na maioria dos corpos de prova e de 0,25 cm nos dois corpos de prova mais carbonatados, desde a frente de carbonatação até cada uma das faces do corpo de prova, conforme a Figura 4.12;

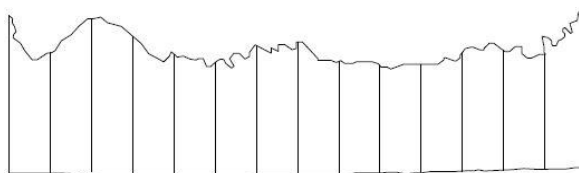


Figura 4.12 - Linhas auxiliares de medição da profundidade de carbonatação numa das faces do corpo de prova

- Realizar o levantamento do valor da profundidade de carbonatação em cada uma das linhas auxiliares definidas no ponto anterior;
- Após a realização de todas as medições, tratar os dados estatisticamente num ficheiro Excel.

4.6.3.1 - Ensaios Preliminares

No sentido de perceber o modo de funcionamento dos equipamentos e as condições de ensaio ideais, de forma a atingir os resultados pretendidos, foram realizados alguns ensaios preliminares. Os ensaios preliminares subdividiram-se em dois tipos, ensaios de carbonatação acelerada e ensaios de degradação por ação de sucessivos ciclos de gelo-degelo. Os testes preliminares de carbonatação acelerada foram realizados com o objetivo de definir a mínima duração dos ensaios de forma a se obter uma profundidade carbonatada significativa. Os ensaios preliminares de gelo-degelo permitiram definir um número mínimo de ciclos necessários para serem observados, através de inspeção visual, sinais de degradação superficial dos corpos de prova. Além do número de ciclos, foi possível definir os tempos de congelação e descongelação da câmara frigorífica.

Para os ensaios preliminares de carbonatação acelerada teve-se em conta a literatura consultada que, na sua grande maioria, aponta o intervalo compreendido entre 50 e 75 % de humidade relativa como sendo o que gera maiores profundidades carbonatadas. Desta forma, definiu-se que os testes iriam ser realizados em humidade relativa de 75 %. Primeiramente ensaiou-se um corpo de prova com uma concentração de 60 % de CO₂, durante 2 dias. Após o ensaio, a profundidade média carbonatada era de apenas 2 mm. No sentido de obter progressos na velocidade de carbonatação realizou-se um segundo ensaio nas mesmas condições de exposição, aumentando apenas a duração para 8 dias. Observou-se uma alteração significativa na profundidade de carbonatação, que aumentou para mais de 1 cm. Definiu-se, assim, que todos os ensaios de carbonatação acelerada iriam decorrer durante um período de 8 dias.

De forma a induzir a degradação de um corpo de prova através de variações térmicas, procedeu-se à inserção do mesmo no interior de uma câmara frigorífica a -25 °C para realizar 15 ciclos de gelo-degelo. Definiu-se uma duração de 24 horas para cada ciclo, 12h de congelamento e 12h de descongelamento. Com o término dos 15 ciclos verificou-se que o corpo de prova não apresentava, a olho nu, quaisquer sintomas de degradação. Para solucionar o problema, e tendo em conta a limitação temporária para a realização dos trabalhos laboratoriais, colocou-se um outro corpo de prova no interior de um saco de plástico resistente, submerso em água, para realizar ciclos gelo-degelo. Com este procedimento pretendia-se acelerar o processo de degradação do corpo de prova. Os tempos de congelamento e descongelamento foram redefinidos, uma vez que a câmara frigorífica gerava gelo muito rapidamente, passado a congelar durante 3h e a descongelar durante 21h. Após estas alterações verificou-se que, com um número reduzido de ciclos, começaram a surgir fissuras superficiais.

4.6.3.2 - Ensaio em corpos de prova padrão

Numa fase inicial de ensaios procurou-se identificar o ambiente mais favorável ao avanço da frente de carbonatação. Ensaíram-se dois corpos de prova de cada ambiente, com condições de cura distintas, perfazendo um total de 8 ensaios. Fixou-se um teor de 60 % de CO₂ no interior da câmara de carbonatação e a temperatura manteve-se aproximadamente constante. As condições dos ensaios são descritas no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Condições de exposição para ensaio acelerado de carbonatação

Ambiente	Humidade Relativa [%]	Concentração de CO ₂ [%]	Temperatura [°C]
A	90 ± 2	60 ± 2	18,5 ± 2
B	75 ± 2		
C	60 ± 2		
D	32 ± 2		

De seguida, pretendeu-se avaliar a evolução da profundidade de carbonatação com o incremento da concentração de CO₂. Sendo o ambiente de 75 % HR o que provoca maior frente de carbonatação, conclusão retida da fase inicial de ensaios, optou-se por realizar os ensaios seguintes com este teor de humidade. Desta forma, foram comparadas as profundidades de carbonatação obtidas em corpos de prova ensaiados com 15 %, 30 % e 60 % de CO₂.

Foram ensaiados 6 corpos de prova, dos quais 3 curados em laboratório e os restantes curados em condições naturais. O Quadro 4.5 sintetiza o procedimento descrito.

Quadro 4.5 - Condições de exposição impostas aos corpos de prova pré-condicionados com 75 % de HR para ensaio acelerado de carbonatação

Ambiente	Humidade Relativa [%]	Concentração de CO ₂ [%]	Temperatura [°C]
B	75 ± 2	60 ± 2	18,5 ± 2
		30 ± 2	
		15 ± 2	

4.6.3.3 - Ensaio em corpos de prova sujeitos a ciclos de gelo-degelo

Os corpos de prova foram submetidos a degradação acelerada pela ação de sucessivos ciclos gelo-degelo e, de seguida, colocados no interior do dispositivo desenvolvido no Capítulo 3 para ensaio acelerado de carbonatação. O objetivo deste procedimento consiste em avaliar o efeito da fissuração no betão, consequência dos ciclos gelo-degelo, no andamento da frente de carbonatação.

Foram realizadas 4 séries de ciclos gelo-degelo. A cada série ficaram submetidos 2 corpos de prova com condições de cura distintas, laboratório e ao natural, o que perfaz um total de 8 corpos de prova. Antes de se dar início a cada série de ciclos, os corpos de prova foram colocados no interior de um saco de plástico resistente, submersos em água, de forma a acelerar a sua degradação.

Para a realização dos ciclos gelo-degelo recorreu-se a uma câmara frigorífica, com temperatura e períodos de aquecimento e refrigeração programados, onde os corpos de prova foram submetidos a séries de 20, 16, 12 e 8 ciclos de gelo-degelo. Cada ciclo teve a duração de 24 horas, 3h de congelação e 21h de descongelação. O congelamento foi realizado a uma temperatura constante de -25 °C e o descongelamento à temperatura ambiente de aproximadamente +18,5 °C. Com o aumento do número de ciclos foi possível observar visualmente na superfície dos corpos de prova algumas alterações significativas, como fissuras e perda de material.

No final de cada série de ciclos gelo-degelo os corpos de prova foram retirados da câmara frigorífica e secos em estufa a uma temperatura de 50 °C durante 24h. De seguida, foram pré-condicionados ao ambiente de 75 % de humidade relativa durante 15 dias até atingirem um teor de humidade interna homogéneo. Após esse período iniciaram-se os ensaios de carbonatação acelerada que, para todos os corpos de prova, decorreram com uma concentração de 60 % de CO₂ e humidade relativa de 75 %. As condições de exposição foram definidas em função da obtenção da maior profundidade de carbonatação possível. O Quadro 4.6 descreve as condições impostas aos corpos de prova no ensaio acelerado de carbonatação.

Quadro 4.6 - Condições de exposição impostas aos corpos de prova degradados pela ação de ciclos gelo-degelo no ensaio acelerado de carbonatação

Nº ciclos	Humidade Relativa [%]	Concentração de CO ₂ [%]	Temperatura [°C]
20	75 ± 2	60 ± 2	18,5 ± 2
16			
12			
8			

Capítulo 5 - Apresentação e análise de resultados

5.1 - Aspectos gerais

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios descritos no Capítulo 4. Para tal, recorreu-se ao uso de tabelas e gráficos de forma a proporcionar uma melhor compreensão dos mesmos.

Inicialmente são apresentados os resultados obtidos nos ensaios destinados à caracterização do betão em estudo. Através do ensaio de absorção de água por capilaridade determinaram-se os coeficientes de capilaridade e de absorção de água de corpos de prova secos e pré-condicionados a uma determinada humidade relativa. Foi também efetuada uma comparação gráfica entre a absorção capilar de corpos de prova curados em condições naturais e em laboratório. Através do ensaio de resistência à compressão foi determinada a tensão de rotura dos corpos de prova. A partir das curvas de intrusão obtidas no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi possível obter informações referentes ao tamanho e distribuição dos poros das amostras em estudo. Com recurso ao ensaio EDX foi possível ter acesso à composição química elementar e composição de óxidos das amostras em análise.

Por fim, apresentam-se os resultados relativos ao ensaio acelerado de carbonatação em corpos de prova padrão e corpos de prova sujeitos a ciclos gelo-degelo. É efetuada uma média da profundidade carbonatada em cada um dos corpos de prova sujeitos ao ensaio e estimada a percentagem de penetração de dióxido de carbono nos mesmos.

Sempre que necessário é efetuada uma comparação entre os resultados obtidos em amostras de betão carbonatadas e não carbonatadas. São ainda comparados os valores observados em corpos de prova curados sob condições de cura distintas.

5.2 - Ensaio de caracterização do betão

5.2.1 - Absorção de água por capilaridade

A metodologia adotada para determinar os coeficientes de absorção de água e capilaridade foi descrita no ponto 4.5.1.

Com os resultados obtidos nas pesagens ao longo do ensaio, é possível traçar uma curva de absorção capilar em relação a um sistema cartesiano. Neste sistema cartesiano as abcissas são

a raiz quadrada do tempo, expresso em raiz quadrada de hora, e as ordenadas o valor resultante da aplicação da expressão $\frac{100 \times M}{A}$, sendo M a variação da massa em Kg e A a superfície em m². O declive do primeiro troço linear corresponde ao coeficiente de capilaridade (C).

Tendo em conta o vasto leque de resultados obtidos ao longo do ensaio, devido à existência de vários corpos de prova, sentiu-se a necessidade de efetuar o cálculo de uma média, desvio padrão e coeficiente de variação.

$$\text{Valor médio} = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (5.1)$$

$$\text{Desvio Padrão} = S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (5.2)$$

$$\text{Coeficiente de variação} = C_v = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \% \quad (5.3)$$

5.2.1.1 - Coeficientes de capilaridade e absorção: corpos de prova secos

No Quadro 5.1 apresentam-se os valores individuais e médios dos coeficientes de absorção e capilaridade para cada corpo de prova, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Quadro 5.1- Coeficientes de absorção e capilaridade dos corpos de prova secos

Tipo de cura	Corpo de prova	Coeficiente de Absorção [Kg.m ⁻² .h ^{-0,5}]				Coeficiente de Capilaridade [g.cm ⁻² .min ^{-0,5}]			
		Valor individual	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação [%]	Valor individual	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação [%]
Cura ao natural	P1_N	1,2309	1,2241	0,0317	2,59	1,5891	1,5803	0,0410	2,59
	P2_N	1,1831				1,5273			
	P3_N	1,2226				1,5783			
	P4_N	1,2600				1,6266			
Cura em laboratório	P1_L	1,0736	1,1290	0,0835	7,40	1,3861	1,4575	0,1079	7,40
	P2_L	1,2306				1,5887			
	P3_L	1,1628				1,5012			
	P4_L	1,0490				1,3542			

Os corpos de prova curados em condições naturais apresentam coeficientes de capilaridade e absorção mais homogêneos, ou seja, com menor desvio padrão.

Através dos gráficos das Figuras 5.1 e 5.2 conclui-se que os corpos de prova curados em laboratório apresentam coeficientes de capilaridade e absorção médios inferiores aos corpos de prova curados em condições naturais.

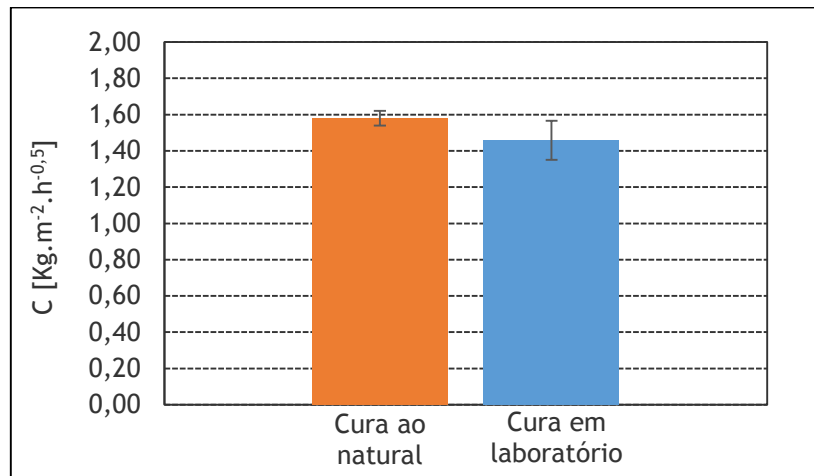


Figura 5.1 - Média e desvio padrão do coeficiente de capilaridade

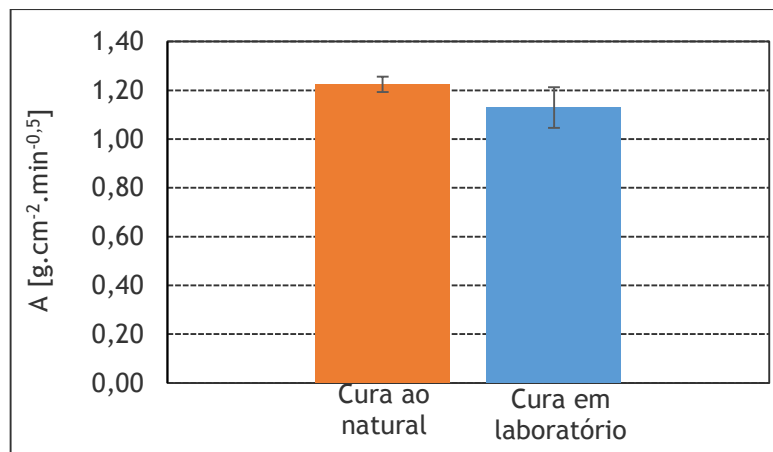


Figura 5.2 - Média e desvio padrão do coeficiente de absorção

A partir dos seus coeficientes de absorção e de capilaridade os corpos de prova podem ser classificados, respetivamente, pela norma DIN 52617 e pela norma francesa NF B 10 502 [70]. Os Quadros 5.2 e 5.3 apresentam as classificações que podem ser atribuídas aos corpos de prova.

Quadro 5.2 - Classificação dos materiais com base nos coeficientes de absorção [70] (adaptado)

Classificação do Material	Coefficiente de Absorção [Kg.m ⁻² .h ^{-0,5}]
Sucção Rápida	$A > 2$
Inibidor de água	$0,5 < A \leq 2$
Quase impermeável	$0,001 < A \leq 0,5$
Impermeável	$A \leq 0,001$

Quadro 5.3 - Classificação dos betões com base nos coeficientes de capilaridade [70] (adaptado)

Classificação do Material	Coeficiente de Capilaridade [g.cm ⁻² .min ^{-0,5}]
Forte capilaridade	$C > 4$
Fraca capilaridade	$1,5 \leq C \leq 4$
Muito fraca capilaridade	$C < 1,5$

No presente caso de estudo e de acordo com a classificação da DIN 52617, os betões curados em condições naturais e em laboratório classificam-se como inibidores de água ($0,5 < A \leq 2$ Kg.m⁻².h^{-0,5}). Segundo a classificação da NF B 10 502, os betões curados em condições naturais classificam-se de fraca capilaridade ($1,5 \leq C \leq 4$ g.cm⁻².min^{-0,5}) e os curados em laboratório classificam-se de muito fraca capilaridade ($C < 1,5$ g.cm⁻².min^{-0,5}).

5.2.1.2 - Coeficientes de capilaridade e absorção: corpos de prova pré-condicionados

No Quadro 5.4 apresentam-se os valores dos coeficientes de absorção e capilaridade dos corpos de prova sujeitos a pré-condicionamento.

Quadro 5.4 - Coeficientes de absorção e capilaridade dos corpos de prova pré-condicionados

Tipo de cura	Corpo de prova	Coeficiente de Absorção [Kg.m ⁻² .h ^{-0,5}]	Coeficiente de Capilaridade [g.cm ⁻² .min ^{-0,5}]
Natural	P5_N	1,2161	1,5699
Laboratório	P5_L	1,0284	1,3277

Segundo a classificação da DIN 52617, os corpos de prova podem ser classificados como inibidores de água. Através da NF B 10 502, os betões curados em condições naturais classificam-se de fraca capilaridade e os curados em laboratório classificam-se de muito fraca capilaridade.

Nos corpos de prova curados em laboratório os coeficientes de absorção e de capilaridade sofrem, tal como em 5.2.1.1, um pequeno decréscimo relativamente aos coeficientes verificados nos corpos de prova curados em condições naturais.

5.2.1.3 - Absorção capilar: corpos de prova curados em condições naturais

No Quadro 5.5 apresentam-se as massas de quatro corpos de prova, sem qualquer tipo de pré-condicionamento, obtidas através de várias pesagens ao longo do ensaio de absorção de água por capilaridade. O Quadro 5.6 apresenta a absorção capilar correspondente a cada corpo de prova.

Quadro 5.5 - Resultados da medição das massas dos corpos de prova secos curados ao natural

Provete nº	M ₀ [g]	Área [m ²]	Massa [g]			
			M _{3h} [g]	M _{6h} [g]	M _{24h} [g]	M _{72h} [g]
P1_N	1436,79	0,0079	1453,27	1460	1484,15	1513,45
P2_N	1537,93		1553,76	1559,96	1583,45	1615,32
P3_N	1468,75		1486,13	1492,37	1515,79	1541,63
P4_N	1551,83		1571,61	1578,28	1600,31	1628,32

Quadro 5.6 - Absorção capilar dos corpos de prova secos curados ao natural

Provete nº	k _{3h} [Kg/m ²]	k _{6h} [Kg/m ²]	k _{24h} [Kg/m ²]	k _{72h} [Kg/m ²]
P1_N	2,0983	2,9552	6,0301	9,7607
P2_N	2,0155	2,8049	5,7958	9,8536
P3_N	2,2129	3,0074	5,9893	9,2794
P4_N	2,5185	3,3677	6,1727	9,7390
Kméd	2,1556	2,9813	6,0097	9,7498

No Quadro 5.7 apresentam-se as massas de um corpo de prova pré-condicionado a 75 % de HR, obtidas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade. O Quadro 5.8 apresenta a absorção capilar correspondente ao corpo de prova.

Quadro 5.7 - Resultados da medição das massas do corpo de prova pré-condicionado curado ao natural

Provete nº	M ₀ [g]	Área [m ²]	Massa [g]			
			M _{3h} [g]	M _{6h} [g]	M _{24h} [g]	M _{72h} [g]
P5_N	1480,81	0,0079	1496,82	1502,51	1527,6	1548,95

Quadro 5.8 - Absorção capilar do corpo de prova pré-condicionado curado ao natural

Provete nº	k_{3h} [Kg/m ²]	k_{6h} [Kg/m ²]	k_{24h} [Kg/m ²]	k_{72h} [Kg/m ²]
P5_N	2,0385	2,7629	5,9575	8,6759

O gráfico da Figura 5.3 compara a absorção capilar dos corpos dos corpos de prova com e sem pré-condicionamento.

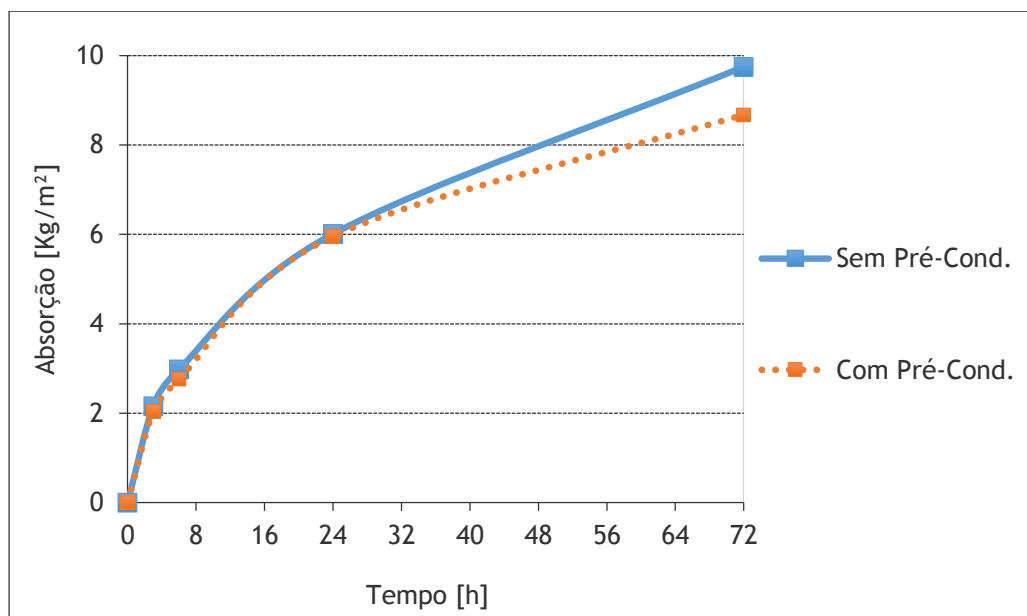


Figura 5.3 - Comparação da absorção capilar em corpos de prova com e sem pré-condicionamento, curados em condições naturais

Através do gráfico observa-se que os corpos de prova sem pré-condicionamento apresentam uma absorção capilar superior aos corpos de prova pré-condicionados. A diferença é pouco significativa nas primeiras 24 horas, tornando-se mais acentuada entre as 24 e as 72 horas.

5.2.1.4 - Absorção capilar: corpos de prova curados em laboratório

No Quadro 5.9 apresentam-se as massas obtidas ao longo do ensaio de absorção de água por capilaridade em quatro corpos de prova curados em laboratório, sem qualquer tipo de pré-condicionamento. O Quadro 5.10 apresenta a absorção capilar correspondente a cada corpo de prova.

Quadro 5.9 - Resultados da medição das massas dos corpos de prova secos curados em laboratório

Provete nº	M ₀ [g]	Área [m ²]	Massa [g]			
			M _{3h} [g]	M _{6h} [g]	M _{24h} [g]	M _{72h} [g]
P1_L	1514,39	0,0079	1529,45	1535,16	1555,7	1583,2
P2_L	1507,88		1523,97	1531,07	1555,23	1583,58
P3_L	1441,62		1457,24	1463,49	1486,36	1516,44
P4_L	1496,37		1510,91	1516,56	1536,73	1563,66

Quadro 5.10 - Absorção capilar dos corpos de prova secos curados em laboratório

Provete nº	k _{3h} [Kg/m ²]	k _{6h} [Kg/m ²]	k _{24h} [Kg/m ²]	k _{72h} [Kg/m ²]
P1_L	1,9175	2,6445	5,2598	8,7612
P2_L	2,0486	2,9526	6,0288	9,6384
P3_L	1,9888	2,7846	5,6965	9,5264
P4_L	1,8513	2,5707	5,1388	8,5676
Kméd	1,9531	2,7145	5,4781	9,1438

No Quadro 5.11 apresentam-se as massas obtidas ao longo do ensaio de absorção de água por capilaridade num corpo de prova pré-condicionado com 75 % de HR. O Quadro 5.12 apresenta a absorção capilar correspondente ao corpo de prova.

Quadro 5.11 - Resultados da medição das massas do corpo de prova pré-condicionado curado em laboratório

Provete nº	M ₀ [g]	Área [m ²]	Massa [g]			
			M _{3h} [g]	M _{6h} [g]	M _{24h} [g]	M _{72h} [g]
P5_L	1437,19	0,0079	1450,4	1455,71	1476,76	1500,79

Quadro 5.12 - Absorção capilar do corpo de prova pré-condicionado curado em laboratório

Provete nº	k _{3h} [Kg/m ²]	k _{6h} [Kg/m ²]	k _{24h} [Kg/m ²]	k _{72h} [Kg/m ²]
P5_L	1,6819	2,3580	5,0382	8,0978

O gráfico da Figura 5.4 compara a absorção capilar dos corpos dos corpos de prova com e sem pré-condicionamento.

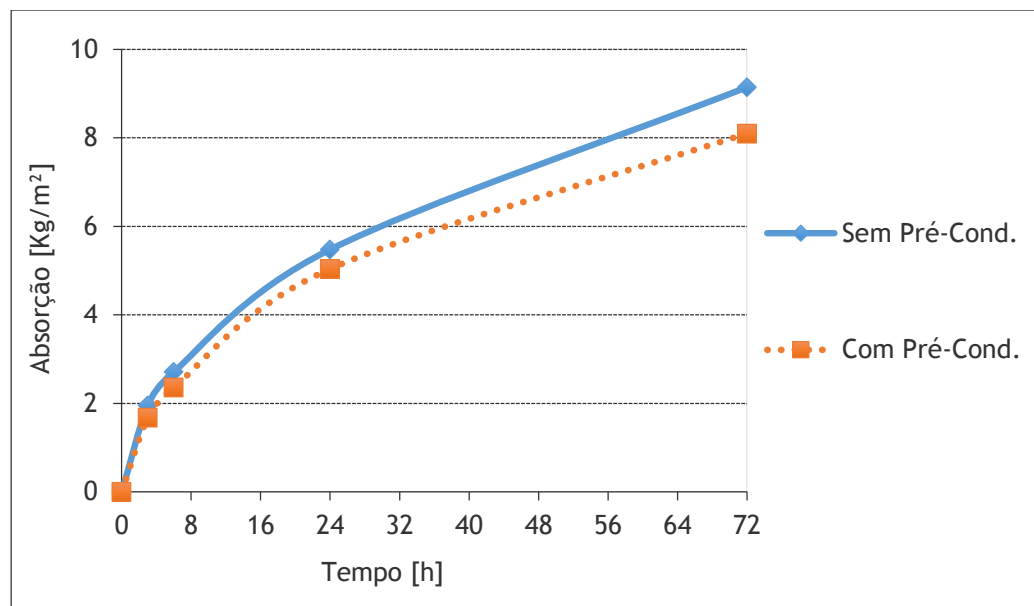


Figura 5.4 - Comparação da absorção capilar em corpos de prova com e sem pré-condicionamento, curados em laboratório

Através do gráfico observa-se que os corpos de prova sem pré-condicionamento apresentam, ao longo do tempo do ensaio, uma absorção capilar superior aos corpos de prova pré-condicionados.

Os corpos de prova curados em condições naturais apresentam uma absorção capilar superior aos curados em laboratório.

5.2.2 - Resistência à compressão

Seguindo a metodologia descrita no ponto 4.5.2, foi possível obter a média das tensões de rotura verificadas nos corpos de prova sujeitos ao ensaio de resistência à compressão. Os valores apresentam-se no Quadro 5.13. São também apresentados os valores do desvio padrão e do coeficiente de variação para as medições efetuadas.

Quadro 5.13 - Resultados do ensaio de resistência à compressão

Identificação do corpo de prova	Tipo de cura	Tensão de rotura [MPa]	Média da Tensão de rotura [MPa]	Desvio Padrão	Coef. de Variação [%]
P1_N	Natural	67,56	55,81	7,72	13,84
P2_N		57,23			
P3_N		49,21			
P4_N		54,39			
P1_L	Laboratório	51,24	53,64	3,63	6,77
P2_L		53,60			
P3_L		53,67			
P4_L		59,74			

A média da tensão de rotura obtida nos corpos de prova curados em condições naturais é muito semelhante à verificada nos corpos de prova curados em laboratório. No entanto, os primeiros apresentam uma média ligeiramente superior.

Apesar de não ter sido efetuado um tratamento estatístico dos dados segundo a NP EN 206, já que não era âmbito do trabalho, estima-se que o betão em estudo desenvolveu uma grande resistência ao longo do tempo de cura em comparação com aquela para que foi produzido.

Devido ao facto de os corpos de prova curados em condições naturais apresentarem uma maior variação nos valores das tensões de rotura, o desvio padrão apresenta-se duas vezes superior relativamente ao obtido em corpos de prova curados em laboratório. Estes resultados são previsíveis dado que os corpos de prova curados em condições naturais foram suscetíveis a diferentes variações de temperatura.

5.2.3 - Porosimetria por intrusão de mercúrio

A metodologia adotada para determinar a porosimetria por intrusão de mercúrio foi descrita no ponto 4.5.3. De seguida são apresentados e discutidos os resultados obtidos no estudo realizado com microporosímetro de mercúrio em amostras carbonatadas e não carbonatadas.

Através do volume cumulativo de mercúrio, para sucessivos aumentos de pressão, é possível obter uma curva de intrusão que fornece informações relativas ao material em estudo, nomeadamente sobre o tamanho e distribuição dos poros. O gráfico da Figura 5.5 apresenta o volume de mercúrio intrudido acumulado, para diferentes diâmetros de poros, nas quatro amostras em estudo.

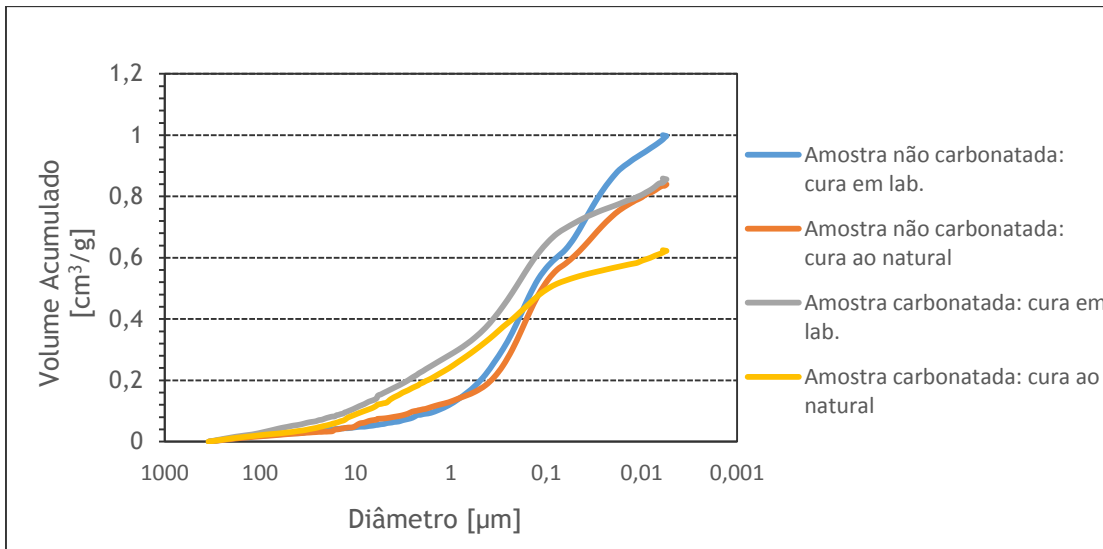


Figura 5.5 - Volume de mercúrio intrudido acumulado em função do diâmetro dos poros

Comparando os resultados das amostras não carbonatadas e carbonatadas verifica-se que o processo de carbonatação reduz a porosidade. A significativa mudança da distribuição de poros após carbonatação é bem clara através das curvas de intrusão. A comparação entre estas amostras pode ser realizada a partir de intervalos de diâmetros de poros. Para as amostras curadas em laboratório é possível visualizar-se que sensivelmente entre 0,005 e 0,40 μm ocorre uma diminuição do volume de poros da amostra carbonatada, e que entre 0,40 μm e o maior diâmetro de poros ocorre um aumento do volume de poros da mesma amostra. No que diz respeito às amostras curadas em condições naturais, pode observar-se que entre 0,005 e 0,12 μm ocorre uma diminuição do volume de poros na amostra carbonatada e que entre 0,12 μm e o maior diâmetro de poros ocorre um aumento do volume de poros na mesma amostra.

Comparando as duas amostras não carbonatadas em estudo pode observar-se que apresentam uma distribuição de poros similar. No entanto, nos diâmetros inferiores a 1 μm a amostra curada ao natural apresenta uma redução no volume de intrusão relativamente à amostra curada em laboratório. Comparando as amostras carbonatadas pode concluir-se que a amostra curada em condições naturais apresenta um volume de intrusão inferior ao da amostra curada em laboratório.

A maior intrusão de mercúrio ocorre em diâmetros de poros compreendidos entre 0,01 e 0,1 μm , correspondendo à maior área de gráfico sob cada uma das linhas apresentadas, e a menor em diâmetros de poros compreendidos entre 1 e 100 μm . O primeiro intervalo corresponde à área máxima relacionada com a elevada quantidade de diâmetros de poros e o segundo intervalo corresponde à menor área relacionada com a menor quantidade de diâmetros de poros da amostra.

Para a porosidade total das amostras não carbonatadas curadas em laboratório e em condições naturais foram encontrados valores de 1 cm^3/g e 0,84 cm^3/g , respetivamente. Em amostras

carbonatadas a porosidade total foi de $0,86 \text{ cm}^3/\text{g}$ para a cura em laboratório e $0,62 \text{ cm}^3/\text{g}$ para a cura em condições naturais.

O gráfico da Figura 5.6 apresenta a diferença matemática da intrusão cumulativa entre a amostra carbonatada e a não carbonatada, para os dois tipos de cura considerados, e explica o desenvolvimento do volume de poros após o processo de carbonatação. O intervalo de diâmetros de poros correspondente a uma diferença de intrusão positiva aponta para uma redução no volume de poros devido ao processo de carbonatação. O intervalo de tamanhos de poros correspondente a uma diferença de intrusão negativa aponta para um aumento no volume de poros após a carbonatação.

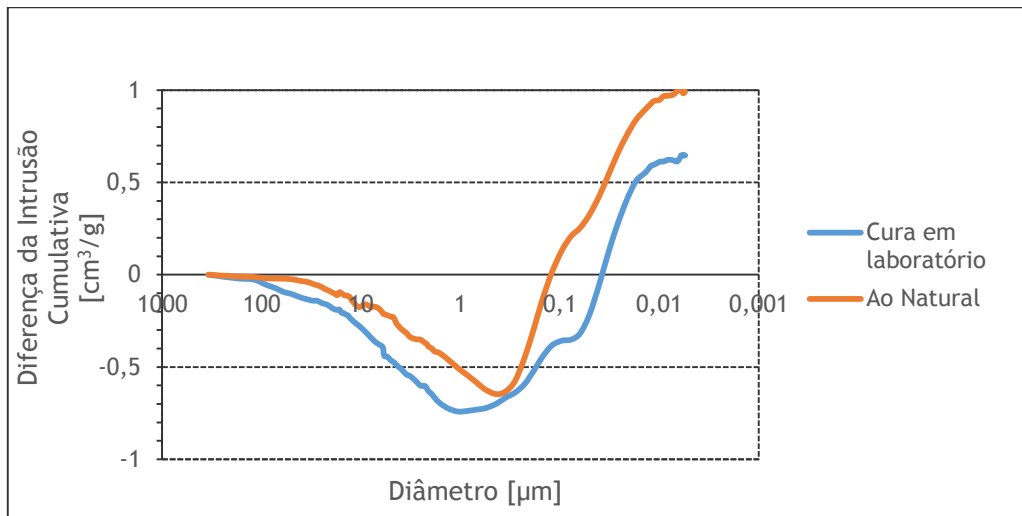
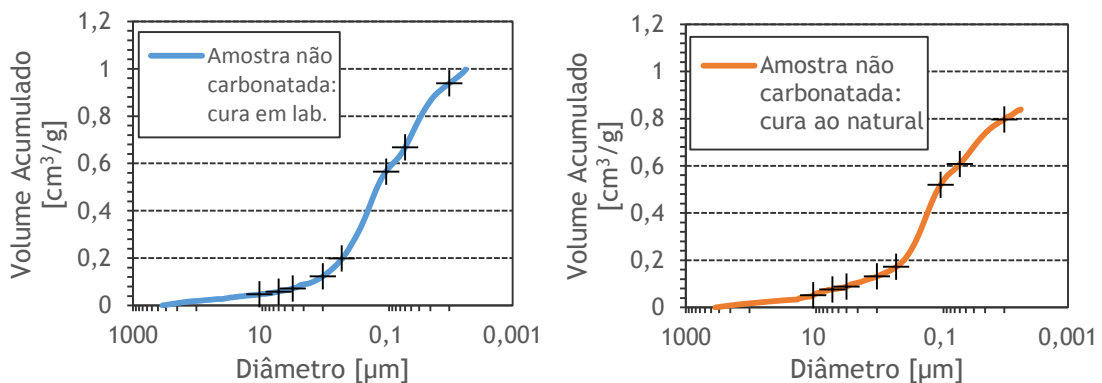


Figura 5.6 - Diferença da intrusão cumulativa de mercúrio

Através das curvas de porosimetria correspondentes a cada uma das amostras é possível analisar determinadas faixas de porosidade. Para tal, foram marcados sobre as curvas pontos correspondentes a cada diâmetro que caracteriza os poros em análise, conforme os gráficos da Figura 5.7.



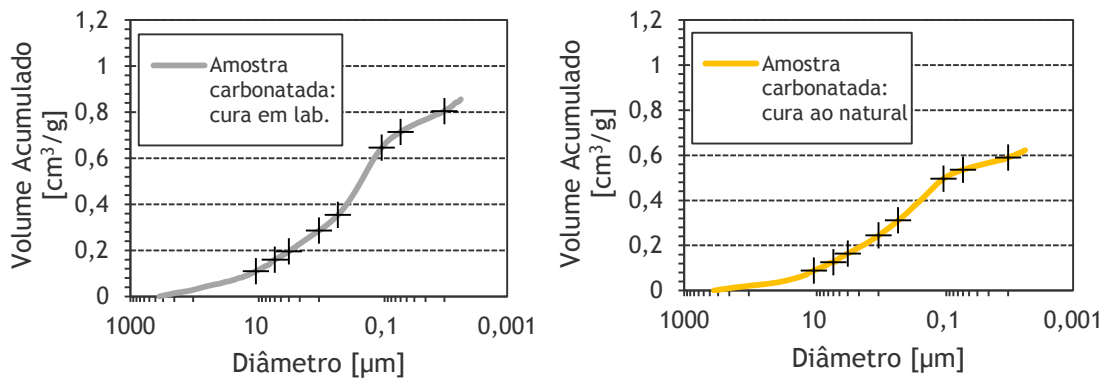


Figura 5.7 - Curvas de porosimetria de cada amostra

Através das curvas apresentadas pode observar-se que, principalmente para os intervalos localizados entre 0,5-0,1 μm e 0,05-0,01 μm , ocorrem deslocamentos significativos. Estes deslocamentos podem ser melhor visualizados no gráfico da Figura 5.8 e correspondem à diferença do volume acumulado de mercúrio entre os intervalos de diâmetros considerados. Através do gráfico conclui-se que a maior intrusão de mercúrio ocorreu nos poros de diâmetro mais reduzido. É também possível concluir que as amostras curadas em laboratório apresentam uma maior porosidade em relação às amostras curadas em condições naturais.

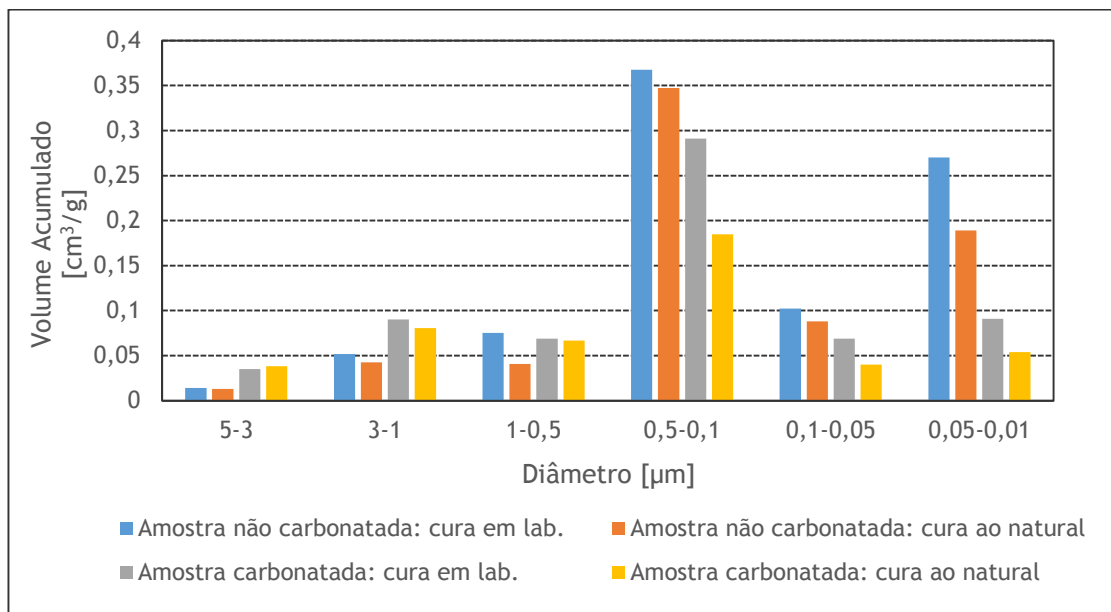


Figura 5.8 - Distribuição de tamanho de poros por faixas de diâmetros

O gráfico da Figura 5.9 apresenta a distribuição do tamanho dos poros de cada amostra segundo a classificação de Mindess e Young, na qual se dividem os capilares em grandes/macroporos ($\phi > 0,05$), médios/mesoporos ($0,01 < \phi < 0,05$) e pequenos/microporos ($\phi < 0,01$) [75].

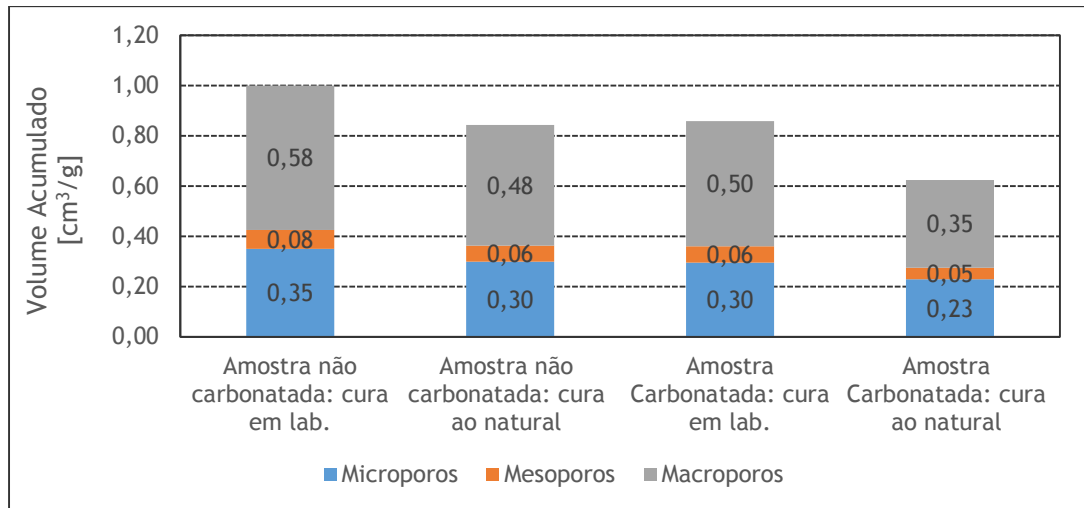


Figura 5.9 - Distribuição do tamanho de poros

Após a análise do gráfico conclui-se que as amostras apresentam uma distribuição de poros semelhante. Devido à maior quantidade de macroporos ($\phi > 0,05$) as amostras consideram-se muito porosas.

O gráfico da Figura 5.10 apresenta, para todas as amostras, o volume de intrusão incremental para diferentes diâmetros de poros.

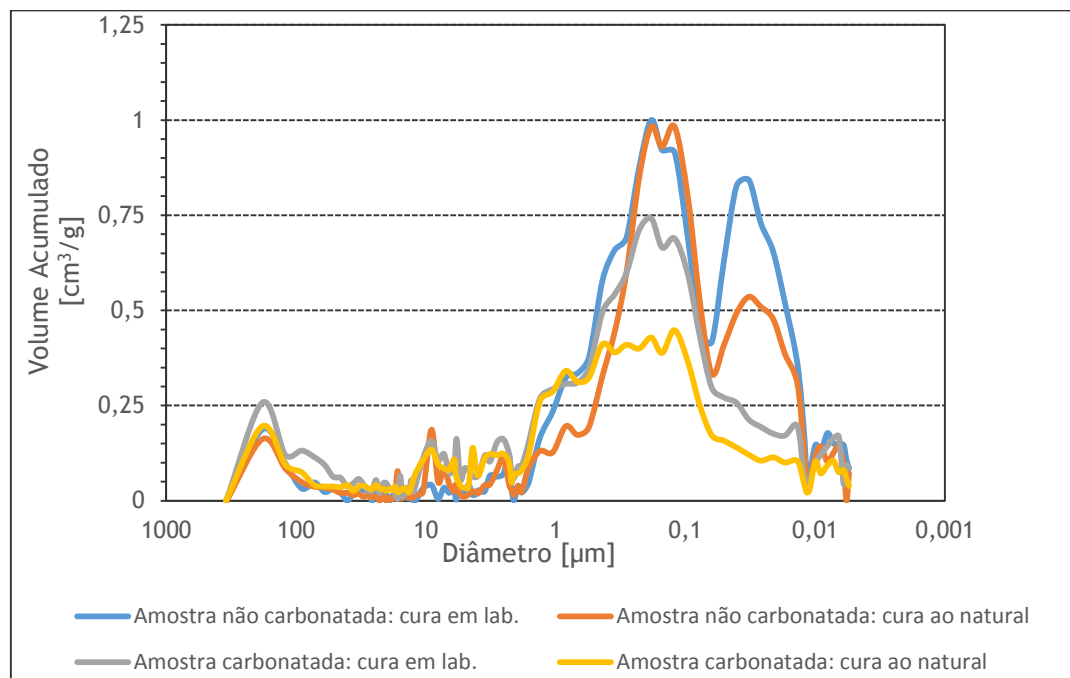


Figura 5.10 - Distribuição de poros por volume de mercúrio intrudido

As amostras apresentam uma distribuição de poros com diâmetro médio em torno de 0,1 μm, à volta do qual se concentra a maior quantidade de poros. Apresentam, ainda, uma pequena percentagem de poros de maior dimensão com diâmetro médio de 180 μm.

5.2.4 - Composição química

A metodologia adotada para determinar a composição química das amostras em estudo é apresentada no capítulo 4.5.4. Através da análise dos seguintes gráficos, construídos a partir dos resultados do ensaio EDX, é possível visualizar a composição química elementar e a composição de óxidos das amostras. O gráfico da Figura 5.11 é referente à composição química elementar das amostras.

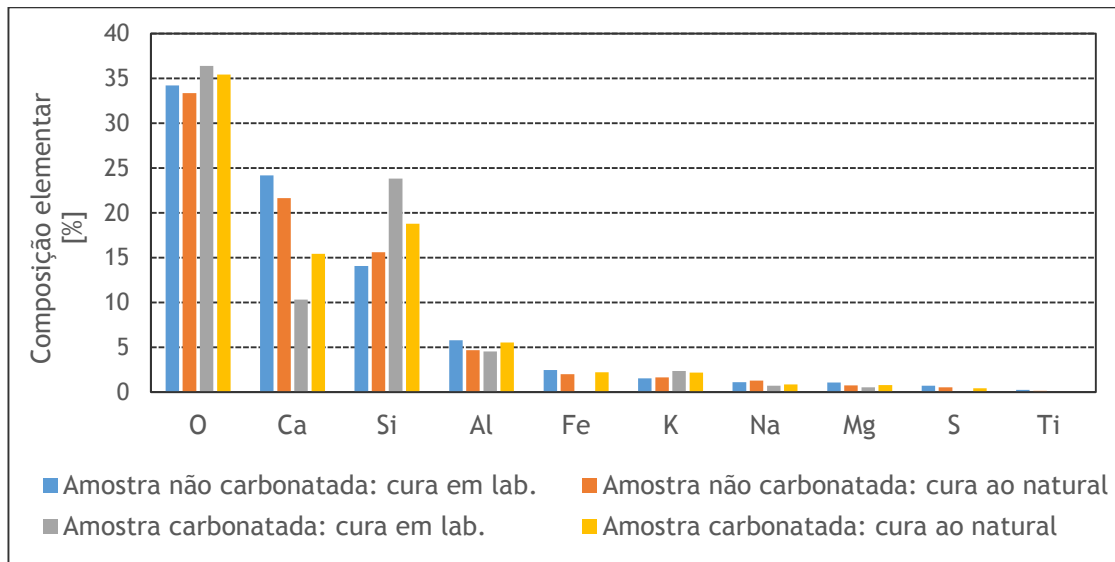


Figura 5.11 - Composição química elementar em cada amostra

Através da análise do gráfico da Figura 5.11 observa-se que todas as amostras são constituídas maioritariamente por oxigénio, cálcio, silício e alumínio. Após a carbonatação pode observar-se que ocorre um aumento relativo da percentagem de oxigénio e silício, e uma redução relativa da percentagem de cálcio. Após o processo de carbonatação, a percentagem de alumínio sofre uma redução relativa na amostra curada em laboratório. Na amostra curada em condições naturais, ocorre um aumento relativo deste elemento após carbonatação.

No que toca às amostras não carbonatadas, a maior percentagem de oxigénio, cálcio e alumínio pode ser encontrada na amostra curada em laboratório. No entanto, a maior quantidade de silício verifica-se na amostra curada em condições naturais. No que diz respeito às amostras carbonatadas, a maior percentagem de cálcio e alumínio pode ser encontrada na amostra curada em condições naturais e a maior percentagem de oxigénio e silício na curada em laboratório.

O Quadro 5.14 resume as percentagens dos principais elementos químicos das amostras e o rácio Ca/Si.

Quadro 5.14 - Percentagem dos principais elementos e rácio Ca/Si

Tipo de Amostra	Tipo de cura	% Principais Elementos				% Restantes elementos	Ca/Si
		Oxigénio	Cálcio	Sílica	Alumínio		
Padrão	Laboratório	40,03	28,30	16,45	6,78	8,44	1,72
	Natural	40,82	26,51	19,09	5,75	7,83	1,39
Carbonatada	Laboratório	46,23	13,14	30,24	5,78	4,61	0,43
	Natural	43,33	18,86	23,00	6,78	8,03	0,82

Segundo Glasser e Matschei, o consumo de hidróxido de cálcio através da carbonatação provoca baixas razões Ca/Si nos C-S-H. Os autores sugerem que quando $Ca/Si < 1,3$ nos C-S-H a estrutura carbonatada formada é uma calcite estável [76].

Os resultados obtidos vão de encontro com o esperado. Nas amostras não carbonatadas a razão Ca/Si é superior a 1,3, indicando que os C-S-H permanecem desafetados pela carbonatação. Já nas amostras carbonatadas a mesma razão é inferior a 1,3, indicando o esgotamento de hidróxido de cálcio e o decréscimo progressivo dos C-S-H.

O gráfico da Figura 5.12 mostra as percentagens dos óxidos constituintes das amostras.

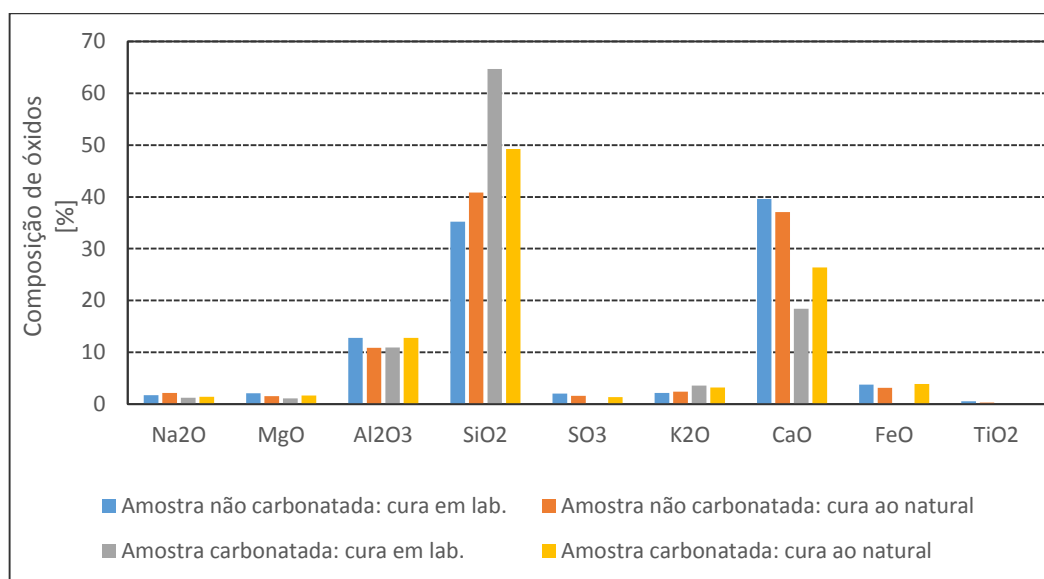


Figura 5.12 - Composição química de óxidos em cada amostra

Com base nos dados do gráfico da Figura 5.12 percebe-se que todas as amostras são constituídas, essencialmente, por óxido de silício e óxido de cálcio. Nas amostras curadas em laboratório o processo de carbonatação provoca um aumento relativo na quantidade de óxido de silício em cerca de 50 % e uma redução relativa na quantidade de óxido de cálcio para cerca de metade. Nas amostras curadas em condições naturais, o processo de carbonatação provoca um ligeiro aumento relativo na percentagem do óxido de silício e um decréscimo relativo na percentagem de óxido de cálcio.

Nas amostras não carbonatadas a maior percentagem de óxido de silício surge na espécime curada em condições naturais e nas amostras carbonatadas a maior percentagem do mesmo óxido surge na curada em laboratório. A maior quantidade de óxido de cálcio nas amostras não carbonatadas surge na curada em laboratório, contrariamente ao que ocorre nas amostras carbonatadas.

Através dos espectros de raio-X exibidos nas seguintes figuras, obtidos pela análise EDX, é possível conferir o que foi dito anteriormente no que concerne à composição de óxidos das amostras.

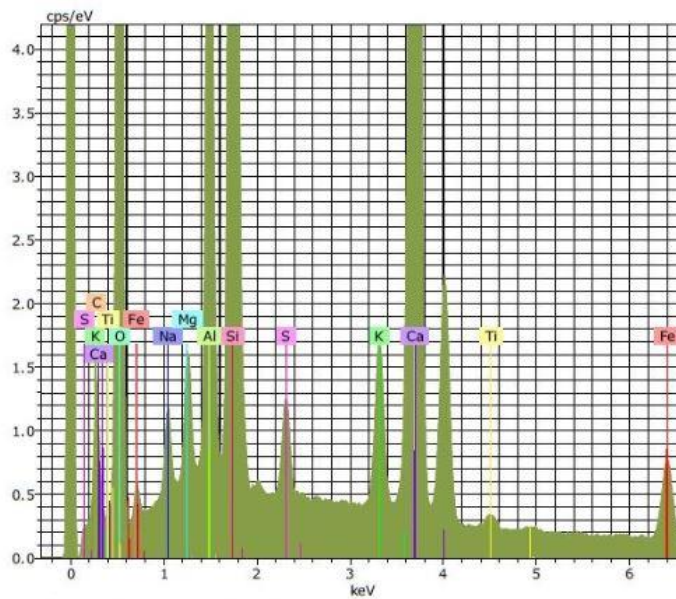


Figura 5.13 - Análise química da amostra não carbonatada curada em laboratório

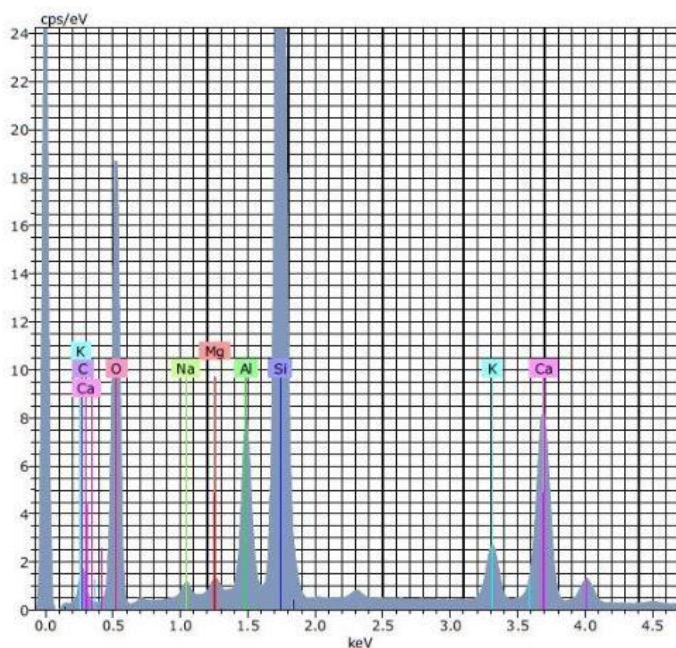


Figura 5.14 - Análise química da amostra carbonatada curada em laboratório

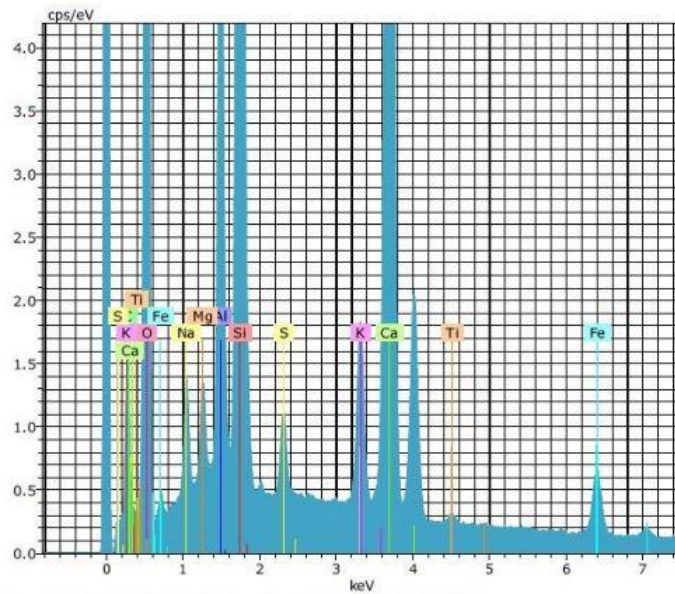


Figura 5.15 - Análise química da amostra não carbonatada curada em condições naturais

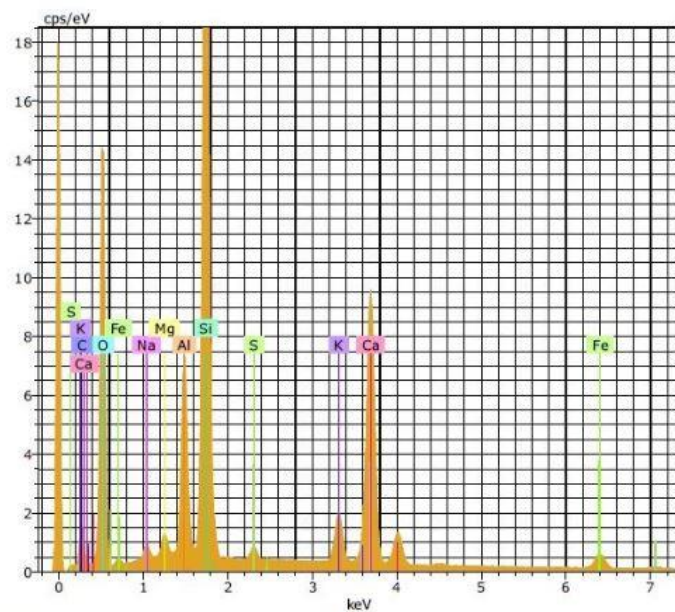


Figura 5.16 - Análise química da amostra carbonatada curada em condições naturais

O gráfico da Figura 5.13 sugere, de forma simplificada, uma predominância de SiO_2 na proporção de 35 %, Al_2O_3 na proporção de quase 13 % e CaO na proporção de quase 40 %. Percebem-se traços de FeO , K_2O , Na_2O , MgO , SO_3 e TiO_2 .

O gráfico da Figura 5.14 sugere, de forma simplificada, uma predominância de SiO_2 na proporção de quase 65 %, Al_2O_3 na proporção de quase 11 % e CaO na proporção de 18 %. Sugere também a presença de traços de K_2O , Na_2O e MgO .

O gráfico da Figura 5.15 sugere uma predominância de SiO₂ na proporção de quase 41 %, Al₂O₃ na proporção de aproximadamente 11 % e CaO na proporção de 37 %. Verificam-se alguns traços de FeO, K₂O, Na₂O, MgO, SO₃ e TiO₂.

O gráfico da Figura 5.16 sugere uma predominância de SiO₂ na proporção de 49 %, Al₂O₃ na proporção de quase 13 % e CaO na proporção de 26 %. Verificam-se alguns traços de Fe₂O₃, K₂O, Na₂O, MgO e SO₃.

5.3 - Ensaio acelerado de carbonatação

A média da profundidade carbonatada de cada corpo de prova foi estimada em duas direções, vertical e horizontal. A direção vertical contempla as faces superior e inferior do corpo de prova e a direção horizontal contempla as faces esquerda e direita.

A partir do Anexo A - Peças Desenhadas é possível consultar os desenhos relativos a cada corpo de prova, com a região carbonatada delimitada e as linhas de medição da profundidade carbonatada definidas. No Anexo B - Folhas de Excel é possível consultar as medições da profundidade carbonatada correspondentes a cada uma das linhas definidas no *software* AutoCAD.

5.3.1 - Ensaio em corpos de prova padrão

No Quadro 5.15 apresenta-se, para as condições de exposição descritas, a média da profundidade carbonatada e o percentual da penetração de CO₂ em cada uma das direções de cada corpo de prova ensaiado.

Quadro 5.15 - Média da profundidade carbonatada em corpos de prova sujeitos a 60 % CO₂ e humidades relativas distintas

Identificação do corpo de prova	Condição de cura	Condições de exposição		Média da profundidade carbonatada [cm]		Média da Penetração de CO ₂ [%]		
		Teor CO ₂ [%]	Humidade relativa [%]	Face sup + inf	Face esq + dir	Face sup + inf	Face esq + dir	
P11	Laboratório	60 ± 2	90 ± 2	1,12	1,08	14,91	10,83	
	Natural			0,98	0,76	13,09	7,59	
P18	Laboratório		75 ± 2	1,26	1,45	16,78	14,49	
	Natural			1,64	1,38	21,83	13,85	
P8	Laboratório		60 ± 2	60 ± 2	0,06	0,00	0,86	0,00
	Natural				0,44	0,00	5,87	0,00
P7	Laboratório		32 ± 2	32 ± 2	0,07	0,00	0,98	0,00
P6	Natural				0,00	0,00	0,00	0,00

A partir dos resultados obtidos é possível verificar que o ambiente de 75 % de HR é o que gera maiores profundidades de carbonatação. Tendo em conta que a maioria dos autores apontam o intervalo compreendido entre 55 e 75 % de HR como o que gera maiores profundidades carbonatadas, os resultados obtidos vão de encontro com o previsto.

Contrariamente ao que seria esperado, o ambiente de 60 % de HR gerou profundidades de carbonatação muito inferiores às obtidas no ambiente de 90 % de HR. Tal facto pode ser justificado pela instabilidade do sal utilizado com a temperatura, na criação do ambiente de 60 % de HR.

O ambiente de 32 % não gerou carbonatação nos corpos de prova. A escassez de humidade no interior dos poros do betão não permitiu o desenvolvimento das reações de carbonatação.

As faces superior e inferior apresentam, em todos os corpos de prova, uma maior penetração de CO₂ relativamente às faces esquerda e direita.

No Quadro 5.16 apresenta-se a média da profundidade de carbonatação obtida nas faces dos corpos de prova pré-condicionados ao ambiente de 75 % de HR, quando sujeitos a diferentes teores de CO₂. É também apresentada a percentagem de penetração de CO₂ nas mesmas faces.

Quadro 5.16 - Média da profundidade carbonatada em corpos de prova pré-condicionados a 75 % de HR e sujeitos a concentrações de CO₂ distintas

Identificação do corpo de prova	Condição de cura	Condições de exposição		Média da profundidade carbonatada [cm]		Média da Penetração de CO ₂ [%]	
		Teor CO ₂ [%]	Humidade relativa [%]	Face sup + inf	Face esq + dir	Face sup + inf	Face esq + dir
P18	Laboratório	60 ± 2	75 ± 2	1,26	1,45	16,78	14,49
	Natural			1,64	1,38	21,83	13,85
P9	Laboratório	30 ± 2		0,76	0,77	10,11	7,69
	Natural			0,69	0,74	9,25	7,42
P5	Laboratório	15 ± 2		0,52	0,46	6,88	4,60
	Natural			0,59	0,51	7,92	5,10

Através dos resultados apresentados no Quadro 5.16 é possível verificar que, para a mesma humidade relativa, o incremento da concentração de CO₂ proporciona profundidades de carbonatação mais elevadas. A concentração de 60 % de CO₂ provoca profundidades carbonatadas superiores às verificadas com o teor de 30 % que, por sua vez, origina maiores profundidades de carbonatação em relação às obtidas com 15 % CO₂. Desta forma é possível afirmar que, nas mesmas condições de humidade relativa e temperatura, a profundidade de carbonatação é diretamente proporcional à concentração de CO₂ aplicada em cada ensaio.

5.3.2 - Ensaio em corpos de prova sujeitos a ciclos de gelo-degelo

No Quadro 5.17 apresentam-se os resultados referentes ao ensaio de corpos de prova, sob 75 % de HR e 60 % de CO₂, sujeitos a degradação pela ação de sucessivos ciclos gelo-degelo.

Quadro 5.17 - Média da profundidade carbonatada em corpos de prova sujeitos a sucessivos ciclos gelo-degelo

Identificação do corpo de prova	Condição de cura	Nº Ciclos gelo-degelo	Média da profundidade carbonatada [cm]		Média da Penetração de CO ₂ [%]	
			Face sup + inf	Face esq + dir	Face sup + inf	Face esq + dir
P13	Laboratório	20	3,06	4,43	40,82	44,29
	Natural		7,50	10,00	100,00	100,00
P16	Laboratório	16	2,92	3,84	38,94	38,36
	Natural		7,50	10,00	100,00	100,00
P19	Laboratório	12	1,89	2,15	25,23	21,48
	Natural		1,68	1,82	22,40	18,17
P17	Laboratório	8	1,15	1,27	15,37	12,71
	Natural		1,31	1,11	17,49	11,13

Através dos resultados obtidos é possível concluir que à medida que o número de ciclos gelo-degelo aumenta, para uma dada concentração de CO₂ e humidade relativa, a profundidade de carbonatação também aumenta. Assim, é legítimo afirmar que a profundidade de carbonatação é diretamente proporcional ao número de ciclos gelo-degelo.

O incremento do número de ciclos gelo-degelo provoca uma maior degradação nos corpos de prova, conduzindo-os a estados de fissuração críticos e ao aparecimento de fendas. A penetração do CO₂ no interior do betão é tanto maior quanto maior o valor da abertura da fenda, e este efeito tende a agravar-se com o tempo.

Na generalidade dos ensaios, a taxa de penetração de CO₂ nas faces superior e inferior dos corpos de prova apresenta-se superior relativamente à taxa de penetração nas faces esquerda e direita.

O gráfico da Figura 5.17 representa a média do percentual de penetração de CO₂ nos corpos de prova sujeitos a 0, 20, 16, 12 e 8 ciclos gelo-degelo. Os resultados obtidos são oriundos dos ensaios efetuados na câmara de carbonatação com 60 % de CO₂ e 75 % de HR. É possível verificar que nos corpos de prova sujeitos à ação de 12, 16 e 20 ciclos gelo-degelo a penetração de CO₂ é superior à verificada nos corpos de prova padrão. Verifica-se, também, que 8 ciclos gelo-degelo não representam aumentos na frente de carbonação pois, como se pode ver pelo gráfico, a percentagem de penetração de CO₂ nestes corpos de prova é semelhante à conseguida em corpos de prova padrão.

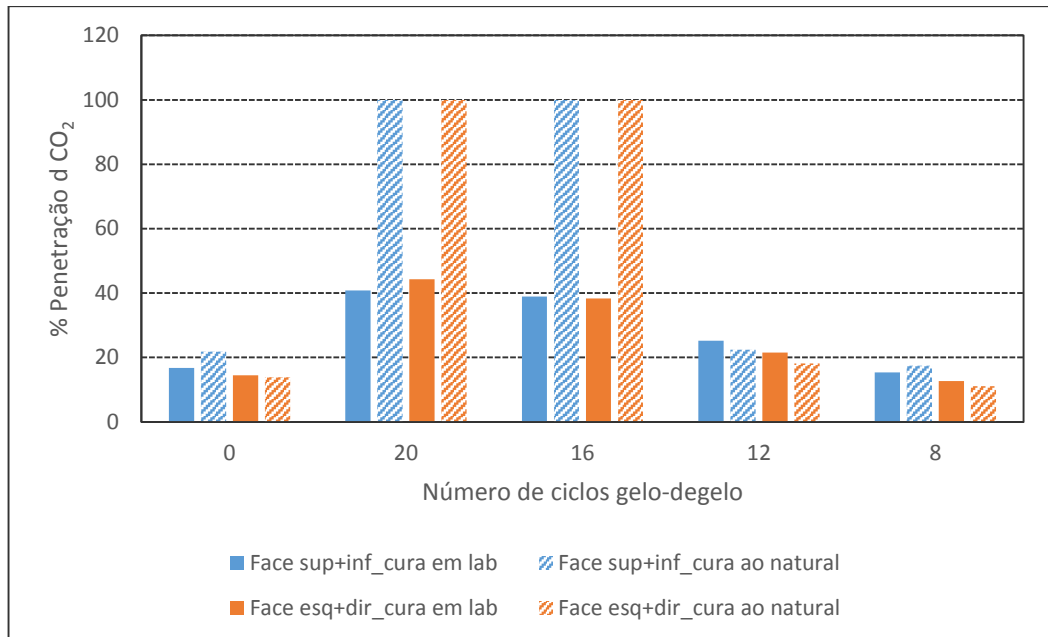


Figura 5.17 - Penetração de CO₂ nos corpos de prova em função do número de ciclos gelo-degelo

5.3.3. Aplicação da 1ª Lei da Difusão de Fick

A profundidade de carbonatação pode ser relacionada com o tempo que o CO₂ demora a penetrar a superfície do betão até ao nível da armadura. Esta afirmação é regida pela primeira lei de difusão de Fick, expressa do seguinte modo [76]:

$$X = K \times \sqrt{t} \quad (5.4)$$

Onde:

X - profundidade de carbonatação (mm).

K - coeficiente de carbonatação (mm/meses^{1/2}).

t - tempo de exposição (meses).

Recorrendo à Equação 5.4 é possível prever a profundidade de carbonatação atingida no betão em estudo C30/37 após um período de exposição de 2 e 30 anos de carbonatação natural. A dificuldade de aplicabilidade da Equação reside na determinação do coeficiente de carbonatação correspondente ao betão em estudo.

No entanto, recorrendo aos estudos efetuados por Valcuende e Parra [77] foi possível contornar essa dificuldade. Estes autores produziram 8 misturas com diferentes características, sendo quatro delas de betão auto-compactável e as restantes quatro de betão normalmente vibrado, e submeteram-nas a ensaio de carbonatação natural durante 9 e 42,5 meses de exposição. Após

esse tempo, mediram a profundidade carbonatada e com o auxílio da Equação 5.4 determinaram os coeficientes de carbonatação correspondentes a cada mistura.

Para o presente estudo adotou-se o coeficiente de carbonatação correspondente à mistura, desenvolvida por Valcuende e Parra, com as características mais próximas das do betão C30/37, descritas no Quadro 5.18. Desta forma, o coeficiente de carbonatação adotado assume o valor de 1,23 e corresponde à Mistura 3 de betão normalmente vibrado, cimento 42,5R e razão água/cimento 0,55. O Quadro 5.19 resume as características da Mistura.

Quadro 5.18 - Composição do betão C30/37

Betão C30/37			
Ligante [Kg]	350,00	Brita 2 [Kg]	540,00
Cimento [Kg]	230,00	Água [Kg]	170,00
Cinzas volantes [Kg]	120,00	Adjuv. Plastificante [Kg]	3,50
Areia M [Kg]	490,00	Adjuv. Superplastificante [Kg]	0,00
Areia F [Kg]	250,00	Razão A/L	0,53
Brita 1 [Kg]	530,00		

Quadro 5.19 - Características da Mistura 3 N-55-42 [77] (adaptado)

Mistura N-55-42			
Cimento [Kg/m ³]	325,00	Agregados Grossos [Kg/m ³]	798,44
Pó calcário [Kg/m ³]	166,75	Água [Kg/m ³]	178,75
Total de partículas finas [Kg/m ³]	491,75	Aditivos [Kg/m ³]	1,63
Areia Fina [Kg/m ³]	0,00	Razão A/L	0,55
Areia Grossa [Kg/m ³]	933,98		

Um vez determinado o coeficiente K, procede-se ao cálculo da profundidade carbonatada após 2 e 30 anos de exposição a carbonatação do betão C30/37.

$$t = 24 \text{ meses,} \quad X = 1,23 \times \sqrt{24} = 6 \text{ mm}$$

$$t = 360 \text{ meses,} \quad X = 1,23 \times \sqrt{360} = 23,3 \text{ mm}$$

Através dos resultados obtidos conclui-se que após 2 e 30 anos de exposição à carbonatação natural a profundidade carbonatada obtida no betão em estudo é de, respetivamente, 6 mm e 2,3 cm.

Ao calcular a média da profundidade carbonatada nas quatro faces dos corpos de prova ensaiados neste trabalho, padrão e degradados por ciclos gelo-degelo, e recorrendo à Equação

5.4, é possível estimar o tempo de exposição necessário para atingir essa profundidade sob carbonatação natural.

$$X_{\text{MÉD_CP PADRÃO}} = 6,4 \text{ mm}, \quad t = \left(\frac{6,4}{1,23} \right)^2 \approx 27 \text{ meses} = 2,3 \text{ anos}$$

$$X_{\text{MÉD_CP DEGRADADOS}} = 38,5 \text{ mm}, \quad t = \left(\frac{38,5}{1,23} \right)^2 \approx 63 \text{ meses} = 5,25 \text{ anos}$$

Os corpos de prova degradados pela ação de ciclos gelo-degelo demorariam cerca de 5,25 anos para atingir 3,85 cm de profundidade carbonatada e os corpos de prova padrão demorariam cerca de 2,3 anos para atingir a profundidade carbonatada de 6,4 mm.

Capítulo 6 - Conclusões e propostas para trabalhos futuros

6.1 - Conclusões

Ao finalizar esta dissertação é possível afirmar que o objetivo inicialmente proposto foi cumprido, uma vez que foram determinadas as profundidades carbonatadas obtidas em corpos de prova sujeitos, ou não, a degradação por ciclos gelo-degelo e analisadas as propriedades relacionadas com a durabilidade e microestrutura dos mesmos. A carência de padronização de um procedimento para os ensaios acelerados de carbonatação dificulta a comparação dos resultados obtidos com as pesquisas geradas por outros pesquisadores.

Com base nos resultados obtidos a partir dos ensaios acelerados de carbonatação realizados, conclui-se que o desenvolvimento da carbonatação está associado às variáveis ambientais de exposição e às características do betão, num processo que ocorre em simultâneo.

Constatou-se que, submetendo corpos de prova em betão a uma concentração constante de 60 % de CO₂ e humidades relativas de 32, 60, 75 e 90 %, as maiores profundidades de carbonatação são conseguidas através do ambiente de 75 % de HR e as menores a partir do ambiente de 32 % de HR. Para um mesmo ambiente de exposição de 75 % de HR verificou-se que, ao incrementar a percentagem de CO₂ as profundidades carbonatadas dos corpos de prova aumentam. Assim, de acordo com as percentagens adotadas para os ensaios, as maiores profundidades de carbonatação foram conseguidas com 60 % de CO₂, seguindo-se as obtidas com 30 % de CO₂ e, por fim, as originadas com 15 % de CO₂.

Verificou-se que ao submeter corpos de prova degradados pela ação de ciclos gelo-degelo ao ensaio acelerado de carbonatação, sob uma concentração de 60 % de CO₂ e HR de 75 %, as maiores profundidades carbonatadas são obtidas nos corpos de prova que sofreram um maior número de ciclos. Assim, as maiores profundidades carbonatadas foram alcançadas nos corpos de prova sujeitos à ação de 20 ciclos, seguindo-se as conseguidas com 16, 12 e, finalmente, 8 ciclos. Para 16 e 20 ciclos gelo-degelo, nas condições de ensaio realizadas, verificou-se que nos corpos de prova curados em laboratório a profundidade de carbonatação aumentou para o dobro em relação aos corpos de prova que não sofreram estes ciclos e que nos corpos de prova curados ao natural a profundidade carbonatada foi de 100 %.

Verificou-se ainda que em todos os ensaios desencadeados, as faces superior e inferior dos corpos de prova apresentam maiores profundidades de carbonatação relativamente às faces esquerda e direita.

No ensaio de absorção de água por capilaridade, apesar de terem sido utilizadas normas diferentes, foi possível concluir que os corpos de prova curados em condições naturais de exposição apresentam coeficientes de capilaridade e de absorção superiores aos curados em laboratório. Da análise dos coeficientes de capilaridade verifica-se que os corpos de prova curados em condições naturais de exposição apresentam fraca capilaridade ($1,58 \text{ g.cm}^{-2}.\text{min}^{-0,5}$) e que os corpos de prova curados em laboratório são praticamente impermeáveis, apresentando muito fraca capilaridade ($1,46 \text{ g.cm}^{-2}.\text{min}^{-0,5}$). Segundo os coeficientes de absorção, todos os corpos de prova ensaiados assumem a classificação de inibidores de água. Nos betões curados em condições naturais de exposição, a absorção capilar nos corpos de prova com e sem pré-condicionamento é aproximadamente semelhante nas primeiras 24 horas de ensaio, verificando-se após esse período um aumento da absorção por parte dos corpos de prova sem pré-condicionamento. Nos betões curados em laboratório, a absorção dos corpos de prova sem pré-condicionamento é superior à dos corpos de prova pré-condicionados ao longo do tempo de ensaio. Os corpos de prova curados em condições naturais apresentam uma absorção capilar superior aos curados em laboratório.

No ensaio de resistência à compressão os corpos de prova evidenciaram tensões de rotura semelhantes, pelo que os curados em condições naturais de exposição apresentam um ligeiro aumento relativamente aos curados em laboratório. Contudo, apresentam uma boa resistência à compressão.

Por meio da análise do volume total intrudido no ensaio com porosímetro de mercúrio, foi constatado que a carbonatação reduz a porosidade total em 14 % nas amostras curadas em laboratório e 27 % nas amostras curadas em condições naturais. Este facto pode estar relacionado com a maior precipitação de carbonato de cálcio na região carbonatada dos poros do betão, conduzindo a uma diminuição da porosidade. Os betões curados em condições naturais de exposição apresentam, tanto na amostra carbonatada como na não carbonatada, um volume intrudido inferior aos betões curados em laboratório. No entanto, na amostra não carbonatada a afirmação anterior só é válida para diâmetros muito reduzidos, inferiores a $1 \mu\text{m}$.

Verificou-se também que os betões curados em laboratório apresentam uma maior porosidade total em comparação com os betões com cura ao natural. A maior intrusão de mercúrio verifica-se em diâmetros compreendidos entre $0,01$ e $0,1 \mu\text{m}$ e a menor intrusão entre 1 e $100 \mu\text{m}$. Quanto à distribuição dos poros pode constatar-se que todas as amostras são constituídas na sua maior parte por macroporos.

Através da espectroscopia de raio-X por dispersão de energia foi possível identificar os principais constituintes químicos e a sua concentração nas amostras de betão carbonatadas e não carbonatadas. Em termos de elementos químicos, evidenciou-se que as amostras são constituídas essencialmente por oxigénio, cálcio e silício. Verificou-se que após o processo de

carbonatação ocorre uma redução da percentagem de cálcio em relação à percentagem de oxigénio e silício. Em termos da composição de óxidos, todas as amostras são constituídas maioritariamente por óxido de silício e óxido de cálcio. Nas amostras curadas em laboratório a quantidade de óxido silício, após carbonatação, aumenta relativamente cerca de 50 % e a quantidade de óxido de cálcio reduz para cerca de metade. Nas amostras curadas em condições naturais o processo de carbonatação provoca um ligeiro aumento na percentagem de óxido de silício e uma redução no óxido de cálcio.

6.2 - Recomendações futuras

Este estudo contribuiu para se dar início a uma proposta de metodologia relativa aos ensaios acelerados de carbonatação, que pode ser incrementada com outros estudos na mesma área de atuação.

Ao longo da investigação realizada surgiram temas que do ponto de vista técnico suscitaram algumas dúvidas e curiosidades, remetendo a sugestões para o prosseguimento da pesquisa e para o desenvolvimento de trabalhos futuros. Assim, com base na bibliografia consultada e nos resultados obtidos, tornam-se pertinentes as seguintes sugestões:

- Analisar a eficácia face à carbonatação da aplicação de diferentes pinturas em betões sujeitos a degradação pela ação de ciclos gelo/degelo; Realização do mesmo procedimento em betões padrão, isentos de degradação pelo ambiente de exposição, e comparação entre os resultados obtidos em ambas as situações;
- Estudar a deteção e medição da corrosão de armaduras do betão devido à ação combinada da carbonatação e ciclos gelo/degelo;
- Determinar coeficientes de carbonatação acelerada em betões sujeitos à ação combinada de carbonatação e ciclos gelo/degelo;
- Determinar e analisar a profundidade de carbonatação em betões com diferentes tipos de aditivos;
- Desenvolver outros estudos relacionando carbonatação acelerada e natural, estabelecendo-se correlações entre os dois ensaios.

Bibliografia

- [1] Isaia, Geraldo Cechella. O Concreto: da era Clássica à Contemporânea. [ed.] Geraldo Isaia. *CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo : IBRACON, 2005, pp. 45-74.
- [2] Andrade, C. e Alonso, C. *Vida útil y vida residual das estruturas de hormigón*. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1996.
- [3] Gaspar, D. *Durabilidad del hormigón; corrosión química; algunas consideraciones*. Madrid : Instituto Eduardo Torroja, 1988.
- [4] Helene, P. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. São Paulo : Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993. Tese (Livre Docente).
- [5] Santos, M. *Deterioração das estruturas de concreto armado - estudo de caso*. Minas Gerais : Escola de Engenharia da UFMG, 2012.
- [6] Nunes, F. e Helene, P. *Influência da Dosagem na Carbonatação dos Concretos*. São Paulo : Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP (BT/PCC/230), 1998. 0103-9830.
- [7] Schiessl, P. e Bakker, R. Measures of protection. [ed.] Peter Schiessl. *Corrosion of steel in concrete*. New York : RILEM, 1988.
- [8] Mailvaganam, N. *Surface Preparation of the Concrete Substrate*. Ottawa : CRC Press, 1991.
- [9] Torgal, F., et al. An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC. *Construction and Building Materials*. 2012, Vol. 36, pp. 141-160.
- [10] Flower, D. e Sanjayan, J. Green house gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2007, Vol. 12, pp. 282-288.
- [11] Gartner, E. Industrially interesting approaches to low-CO₂ cements. *Cement and Concrete Research*. 2004, Vol. 34, pp. 1489-1498.
- [12] Ali, M., Saidur, R. e Hossain, M. A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011, Vol. 15, pp. 2252-2261.
- [13] Peter, M., et al. Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. *Cement and Concrete Research*. 12, 2008, Vol. 38, pp. 1385-1393.
- [14] Younsi, A., et al. Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content. *Cement and Concrete Composites*. 2011, Vol. 33, pp. 993-1000.
- [15] Malhotra, V. Recycled concrete—a new aggregate. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1978, Vol. 5, pp. 42-52.
- [16] Tam, V., Wang, K. e Tam, C. Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. *Journal of Hazardous Materials*. 2008, Vol. 152, pp. 703-714.
- [17] Kihara, Y. e Centurione, S. O Cimento Portland. [ed.] Geraldo Isaia. *CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo : IBRACON, 2005, pp. 295-322.
- [18] Coutinho, A. *Fabrico e propriedades do betão*. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006. p. 646. Vol. 1. 9789724903262.

- [19] Cimentos de Portugal. CIMPOR. *Web site da CIMPOR*. [Online] [Citação: 11 de Junho de 2014.] <http://www.cimpor.pt>.
- [20] Costa, A. Durabilidade de estruturas de betão em ambiente marítimo. Lisboa : Instituto Superior Técnico, 1997. Tese de Doutoramento.
- [21] Jackson, P. Manufacture of portland cement clinker. [autor do livro] F Lea e P Hewlett. *Lea's Chemistry of Cement*. Michigan : ARNOLD, 2007, p. 1053.
- [22] Neville, A. *Proprieties of concrete*. England : Pearson Education Limited, 2008.
- [23] Tattersall, G e Banfill, P. *The reology of fresh concrete*. Michigan : Pitman Advanced Publishing Program, 1983. p. 356. 0273085581.
- [24] Domone, P. *Concrete: Constituent materials of concrete*. [ed.] Illston. London : E&FN Spon, 1994.
- [25] Castro Gomes, J., Said, J. e Cabrera, J. Quantificação e caracterização de cimento não hidratado por microscopia electrónica. Lisboa : Congresso da Ordem dos Engenheiros, 1998.
- [26] Figueiredo, E. Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto. [ed.] Geraldo Isaia. *CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo : IBRACON, 2005, pp. 829-856.
- [27] Costa, A. Anomalias e Mecanismos de deterioração. *Apontamentos da Cadeira de Reabilitação e Reforço Estrutural*. Lisboa : Instituto Superior Técnico, 1999.
- [28] Salta, M. *Introdução à corrosão do aço no betão. Modelos de comportamento às acções agressivas, Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado*. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1996. *Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado*.
- [29] Cascudo, O. *O controle da corrosão de armaduras em concreto, Inspeção e técnicas eletroquímicas*. Goiânia : UFG, 1997. p. 237. 85-7274-096-1.
- [30] Monteiro, I. Modelação da evolução da carbonatação em elementos de betão armado. Lisboa : Instituto Superior Técnico, 2010. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil.
- [31] Yates, T. Mechanisms of Air Pollution Damage to Brick, Concrete and Mortar. [ed.] Peter Brimblecombe. *The effects of air pollution on the built environment*. London : Imperial College Press, 2003, Vol. 2, pp. 107-132.
- [32] Uomoto, T. e Takada, Y. Factor affecting concrete carbonation rate. *Durability of Building Materials and Components*. 1993, Vol. 2, pp. 1133-1141 .
- [33] Polito, G. Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação. Belo Horizonte : UFMG, 2006. Monografia.
- [34] Papadakis, V., Vayenas, C. e Fardis, M. A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation. *AIChE Journal*. 1989, Vol. 35, 10, pp. 1639-1650.
- [35] Figueiredo, C. Estudo da carbonatação em estruturas de concreto armado em Brasília - Avaliação de Pilares. Brasília : Universidade de Brasília, 2004. Tese (Doutorado em estruturas e Construção Civil).
- [36] Roy, S., Poh, K. e Northwood, D. Durability of concrete - accelerated carbonation and weathering studies. *Building and Environment*. 1999, Vol. 34, pp. 486-595.

- [37] Verbeck, G. Second Pacific Area Meeting Papers: Carbonation of hydrated Portland Cement. *Cement and Concrete*. Baltimore : ASTM Special Technical Publication, 1958, pp. 17-36.
- [38] Kazmierczak, C. Contribuição para análise de eficiência de películas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra carbonatação. São Paulo : Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995. Tese de Doutorado.
- [39] Papadakis, V., Vayenas, C e Fardis, M. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Materials Journal*. 1991, Vol. 88, 4.
- [40] Tuutti, K. Corrosion of steel in concrete. Stockholm : Swedish Cement and Concrete, 1982. p. 469. 0346-6906.
- [41] Meyer, A. Investigation on the carbonation of concrete. *International Symposium on the Chemistry of Cement*. 1968, pp. 394-401.
- [42] Barker, A. e Matthews, J. Concrete Durability Specification by Water/Cement or Compressive Strength for European Cement Types. [ed.] V Malhotra. Durability of concrete : Third International Conference, Nice, França, 1994, Vol. 145, pp. 1135-1159.
- [43] Papadakis, V. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement and Concrete Research*. 2000, Vol. 30, 2.
- [44] Parrott, L. Variations of water absorption rate and porosity with depth from an exposed concrete surface: Effects of exposure conditions and cement type. *Cement and Concrete Research*. 1992, Vol. 22, 6, pp. 1077-1088.
- [45] Helene, P. *Corrosão em armaduras para concreto armado*. São Paulo : PINI, 1993. p. 45. Vol. 1.
- [46] Kulakowski, M. Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa. Porto Alegre : Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia.
- [47] Silva, V. Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa. São Paulo : Universidade de São Paulo, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia).
- [48] Silva, A. *Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana*. São Paulo : PINI, 1995. p. 152. 8572660437 .
- [49] Thomas, M. e Matthews, J. Carbonation of fly ash concrete. *Magazine of Concrete Research*. 1992, Vol. 44, 160, pp. 217 -228.
- [50] Thiery, M. Modélisation de la carbonatation atmosphérique des bétons - Prise en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique. Paris : École Nationale des Ponts et Chaussées, 2005. Thèse de doctorat.
- [51] Gonçalves, A e Salta, M. *Métodos de caracterização da resistência dos betões em ambientes agressivos, Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado*. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1996.
- [52] Grubb, J., Limaye, H. e Kakade, A. Testing pH of Concrete: Need for a Standard Procedure. *Concrete international : design & construction*. 2007, Vol. 29, 4, pp. 78-83.

- [53] Coutinho, M. *Melhoria da Durabilidade dos Betões por tratamento da Cofragem*. Porto : FEUP Edições, 2005. p. 35. 972-752-073-1.
- [54] Costa, A. *Degradação das Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado Por Corrosão de Armaduras, Conservação e reparação de estruturas*. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2000.
- [55] Possan, E. *Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado*. Porto Alegre : Universidade Federal do Rio do Sul, 2004. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.
- [56] Kobuku, M. e Nagataki, S. Carbonation of concrete with fly ash and corrosion of reinforcement in 20 years test. [ed.] V Malhotra. *International Conference on fly ash, sílica fume, slag and natural pozzolans in concrete*. Trondheim : American Concrete Institute, 1989.
- [57] Turcry, Ph., Oksri-Nelfia, L. e Ait-Mokhtar, A. Analysis of an accelerated carbonation test with severe preconditioning. *Cement and Concrete Research*. 2014, Vol. 57, pp. 70-78.
- [58] Isaia, G., Vaghetti, M. e Gastaldini, A. Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar. *Congresso Brasileiro do Concreto*. São Paulo : Instituto Brasileiro do Concreto, 2001.
- [59] Castellote, M., et al. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations. *Materials and Structures*. 2008, Vol. 42, pp. 515-525.
- [60] Castro Gomes, J e Ferreira, R. Durabilidade dos materiais: desempenho e projecto prescritivo. *Revista de Materiais de Construção*. Setembro/Outubro, 2009, pp. 42-48.
- [61] Costa, M. *Caracterização das propriedades físicas, mecânicas e térmicas de betões com incorporação de cortiça*. Caracterização das propriedades físicas, mecânicas e térmicas de betões com incorporação de cortiça. Coimbra : Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2011. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil.
- [62] Niu, D., Xiao, Q. e W, Zhu. Concrete Damage and Neutralization under Coupling Effect of Carbonation and Freeze-thaw Cycles. [ed.] Sci. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*. 2012, Vol. 27, 2, pp. 353-357.
- [63] Kuosa, H., et al. Effect of coupled deterioration by freeze-thaw, carbonation and chlorides on concrete service life. *Cement and Concrete Composites*. 2014, Vol. 47, Durability of concrete, pp. 32-40.
- [64] CO₂ Measurement Specialists. CO₂ Metter. *Web site do CO₂ Metter*. [Online] 13 de Julho de 2014. <http://www.co2meter.com/>.
- [65] Quantifoil Instruments GmbH. Quantifoil Instruments. *Web site da Q. Instruments*. [Online] [Citação: 28 de Julho de 2014.] <http://www.qinstruments.com/>.
- [66] RILEM TC 56-MHM. CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Materials and Structures*. 1988, Vol. 21, 126, pp. 453 - 455.
- [67] RILEM TC 116-PCD. TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability. *Materials and Structures*. 1999, Vol. 32, 217, pp. 163-173.

- [68] Castro Gomes, J., et al. Study of preconditioning procedures for absorption and permeability of concrete. *International Conference on Durability of Building Materials and Components*. 2011.
- [69] E 393: 1993. Especificação - Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade. 1993.
- [70] Pereira, C. Estudo da influência de diferentes tipos de agregados no betão estrutural: Durabilidade e zona de interface. Covilhã : Universidade da Beira Interior, 2005. Dissertação de Mestrado.
- [71] E 226: 1968. Especificação - Betões. Ensaio de compressão. 1968.
- [72] Booncharus, S. Carbonation processes of early age lime mortar. *Erasmus Mundus Programme*. Braga : University of Minho, 2008.
- [73] Departamento de Geologia. Degeo. *Web site da Degeo*. [Online] [Citação: 29 de Agosto de 2014.] <http://www.degeo.ufop.br/laboratorios/microlab/mev.htm>.
- [74] E 391: 1993. Especificação - Betões. Determinação da resistência à carbonatação. 1993.
- [75] Tasca, M. Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura. Santa Maria : Universidade Federal de Santa Maria, 2012. Dissertação de Mestrado.
- [76] Abdulrahman, A. e Ismail, M. Assessment of Green Inhibitor on the Crystal Structures of Carbonated Concrete. *Journal Teknologi (Sciences and Engineering)*. 2014, Vol. 69, 3, pp. 1-9.
- [77] Valcuende, M. e Parra, C. Natural carbonation of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*. 2010, Vol. 24, pp. 848-853.

Anexo A
Peças Desenhadas

Anexo B

Tabelas Excel