



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# **Desenvolvimento de um Dispositivo de Ensaio de Carbonatação Acelerada com Controlo de Humidade Relativa**

**Filipe José Martins Saldanha**

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

Orientador: Prof. Prof. Doutor João Paulo de Castro Gomes

**Covilhã, outubro de 2013**



# Dedicatória

Aos meus Pais e Irmãs



# Agradecimentos

Ao Professor Doutor João Paulo de Castro Gomes, agradeço a sua aceitação para orientação científica, o apoio e disponibilidade prestada ao longo da elaboração do presente trabalho.

Ao Sr. Jorge Miguel dos Santos Bento, agradeço toda a ajuda e companhia prestada durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus colegas de curso pelos bons momentos passados e pela enorme ajuda prestada durante o curso.

A todos os meus amigos e namorada por todo o apoio.

Em especial quero agradecer aos meus pais e irmãs, por tudo o que fizeram por mim ao longo de toda a minha vida. Pelo apoio, incentivo e directriz que me ajudaram a seguir. Sem eles nada seria igual. Obrigado



# Resumo

O período de vida útil de uma estrutura em betão armado é dependente do nível de corrosão das armaduras ao longo do tempo e os estudos de durabilidade são cada vez mais importantes na sua previsão. A carbonatação do betão é um dos fenómenos que dá origem à corrosão das armaduras.

Neste trabalho, foi desenvolvido um dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação. Inicialmente efectuou-se uma compilação de conceitos e definições acerca do fenómeno de carbonatação e de metodologias utilizadas. O dispositivo criado é capaz de aprisionar elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> e teor de humidade relativa, simultaneamente. Para isso, criou-se uma câmara de carbonatação a partir de um exsiccador de vidro. A monitorização da concentração foi executada com um sensor de CO<sub>2</sub>. Os diferentes ambientes de humidade relativa foram criados com diferentes tipos de sais, responsável por provocar um diferente teor de humidade relativa ao ambiente. Foram ensaiados, no dispositivo, corpos de prova cilíndricos de betão, utilizando diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> e diferentes ambientes de humidade relativa.

A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que o sistema de ensaio construído revelou-se capaz de realizar o objectivo inicialmente proposto. Comprovou-se também que a concentração de CO<sub>2</sub> e o teor de humidade relativa influenciam em grande escala a profundidade de carbonatação no betão. No entanto, não foi possível fazer comparação de resultados de profundidades de carbonatação com outros investigadores.

## Palavras-chave

Durabilidade do betão, mecanismo de carbonatação, ensaio de carbonatação.



# Abstract

The useful life period of a reinforced concrete structure depends on the levels of corrosion of the reinforcement throughout time and the studies of durability are more and more important in their prevision. The concrete carbonation is one of the phenomena responsible in provoking the reinforcement corrosion.

In this paper/study it was developed an accelerated carbonation testing device. Initially we made a compilation of concepts and definitions about the carbonation phenomena and the methodologies used. The created device is capable of imprisoning high concentrations of CO<sub>2</sub> and relative humidity percentage, simultaneously. For that purpose it was created a carbonation chamber from glass desiccators. The monitoring of the concentration is executed with a CO<sub>2</sub> sensor. The different environments of relative humidity percentage were developed with different kinds of salts, where each one produces a different relative humidity percentage to the environment. On the device, were tested cylindrical specimens of concrete, using different CO<sub>2</sub> concentrations and different relative humidity environmental percentages.

From the obtained results it was possible to conclude that the test system built proved to be capable of achieving the aim initially proposed. We also verified that CO<sub>2</sub> concentration and relative humidity percentage influence, in large scale, the carbonation depth in the concrete. It is extremely hard to compare results of carbonation depths with other investigators.

## Keywords

Concrete durability, carbonation mechanism, carbonation test.



# Índice

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1       | Introdução .....  | 1  |
| 1.1     | Enquadramento do tema.....  | 1  |
| 1.2     | Objectivos .....  | 2  |
| 1.3     | Plano de trabalhos e organização da dissertação .....                       | 2  |
| 2       | Mecanismos de carbonatação no Betão .....                                   | 5  |
| 2.1     | Enquadramento .....   | 5  |
| 2.2     | Mecanismo de carbonatação .....   | 5  |
| 2.3     | Factores que influenciam a carbonatação .....                               | 9  |
| 2.3.1   | Factores externos .....   | 9  |
| 2.3.1.1 | Concentração de CO <sub>2</sub> .....                                       | 9  |
| 2.3.1.2 | Humidade Relativa .....   | 10 |
| 2.3.1.3 | Temperatura.....  | 11 |
| 2.3.2   | Factores internos.....  | 12 |
| 2.3.2.1 | Porosidade .....  | 12 |
| 2.3.2.2 | Cura.....   | 13 |
| 2.3.2.3 | Adições.....  | 14 |
| 2.3.2.4 | Fissuração .....  | 16 |
| 2.4     | Influência da carbonatação nas armaduras .....                              | 16 |
| 2.5     | Ensaio de Carbonatação.....   | 18 |
| 2.5.1   | Métodos de ensaios .....  | 18 |
| 2.5.1.1 | Ensaio ao natural .....   | 18 |
| 2.5.1.2 | Ensaio acelerados .....   | 19 |
| 2.5.2   | Ensaio acelerados de carbonatação.....                                      | 20 |
| 2.6     | Técnicas de medição da profundidade da carbonatação .....                   | 22 |
| 2.7     | Classificação da corrosão por carbonatação segundo a NP EN 206-1 .....      | 26 |
| 3       | Desenvolvimento de um dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação ..... | 27 |
| 3.1     | Enquadramento .....   | 27 |
| 3.2     | Dispositivo inicial .....   | 28 |
| 3.2.1   | Lista de peças .....  | 29 |
| 3.2.2   | Funcionamento .....   | 30 |
| 3.2.2.1 | Fornecimento de CO <sub>2</sub> .....                                       | 30 |
| 3.2.2.2 | Criação condições de humidade relativa.....                                 | 30 |
| 3.2.2.3 | Sensor de CO <sub>2</sub> .....   | 31 |
| 3.2.2.4 | Software.....   | 32 |
| 3.2.3   | Assemblagem do dispositivo .....  | 33 |
| 3.3     | Testes de funcionamento do dispositivo inicial .....                        | 35 |
| 3.3.1   | Sem sistema de ventilação .....   | 36 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.3.2   | Com sistema de ventilação.....  | 37 |
| 3.3.3   | Controlo da concentração de CO <sub>2</sub> .....                       | 37 |
| 3.3.3.1 | Controlo da concentração de CO <sub>2</sub> e HR.....                   | 40 |
| 3.3.3.2 | Controlo da concentração de CO <sub>2</sub> , HR e corpo de prova ..... | 40 |
| 3.3.4   | Funcionamento do dispositivo .....                                      | 40 |
| 3.4     | Dispositivo Final .....   | 41 |
| 4       | Caracterização do betão para o ensaio acelerado de carbonatação .....   | 43 |
| 4.1     | Enquadramento .....   | 43 |
| 4.2     | Especificações do Betão .....   | 43 |
| 4.3     | Execução dos corpos de prova .....                                      | 44 |
| 4.4     | Pré-Condicionamento dos corpos de prova.....                            | 45 |
| 4.5     | Condições de realização e descrição dos ensaios .....                   | 46 |
| 4.5.1   | Ensaio de caracterização do betão .....                                 | 46 |
| 4.5.1.1 | Ensaio de verificação de resistência à compressão.....                  | 46 |
| 4.5.1.2 | Ensaio de absorção capilar .....  | 46 |
| 4.5.1.3 | Determinação de permeabilidade ao oxigénio.....                         | 48 |
| 4.5.1.4 | Determinação de permeabilidade à água .....                             | 49 |
| 4.5.1.5 | Ensaio de porosidade por intrusão de mercúrio.....                      | 50 |
| 4.5.1.6 | Ensaio de análise termogravimétrica (TGA) .....                         | 52 |
| 4.5.2   | Características do betão.....   | 53 |
| 5       | Ensaio acelerado de carbonatação .....                                  | 57 |
| 5.1     | Enquadramento .....   | 57 |
| 5.2     | Pré-condicionamento .....   | 57 |
| 5.3     | Procedimento de ensaio .....  | 59 |
| 5.4     | Profundidades de carbonatação.....                                      | 61 |
| 6       | Conclusões e recomendações futuras .....                                | 65 |
|         | Bibliografia .....  | 67 |

# Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 - Avanço do processo de carbonatação .....   | 8  |
| Figura 2.2- Zonas envolvidas no mecanismo de carbonatação e variação do pH ao longo da profundidade.....                                      | 8  |
| Figura 2.3 - Representação esquemática da difusão do CO <sub>2</sub> .....  | 10 |
| Figura 2.4 - Representação de grau de carbonatação em função da humidade relativa.....  | 11 |
| Figura 2.5 - Diferenças entre permeabilidade e porosidade .....   | 13 |
| Figura 2.6 - Influência da cura na profundidade de carbonatação .....   | 13 |
| Figura 2.7 - Relação entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão aos 28 dias .....                                      | 15 |
| Figura 2.8 - Influência das adições sobre a profundidade de carbonatação .....  | 15 |
| Figura 2.9 - Esquema de carbonatação através de uma fenda .....   | 16 |
| Figura 2.10 - Representação do avanço da frente de carbonatação .....   | 17 |
| Figura 2.11 - Gráfico simplificado do desenvolvimento da corrosão no tempo .....  | 17 |
| Figura 2.12 - Representação do tempo correspondente do ensaio acelerado para o natural que a profundidade de carbonatação seja de 15 mm ..... | 20 |
| Figura 2.13 - Profundidade de carbonatação em função do tempo .....   | 25 |
| Figura 3.1 - Esquema representativo do dispositivo inicial de ensaio acelerado de carbonatação. ....  | 29 |
| Figura 3.2 - Sensor de CO <sub>2</sub> utilizado no desenvolvimento do dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação. ....                  | 32 |
| Figura 3.3 - <i>Software</i> DAS 100 <sup>®</sup> de tratamento de dados registados pelo sensor de CO <sub>2</sub> . ....                     | 33 |
| Figura 3.4 - <i>Software</i> GasLab <sup>®</sup> de tratamento de dados registados pelo sensor de CO <sub>2</sub> . ....                      | 33 |
| Figura 3.5 - Colocação da rolha de silicone e componentes na tampa do exsiccador. ....  | 34 |
| Figura 3.6 - Colocação do sensor e tubos na rolha de silicone. ....   | 34 |
| Figura 3.7 - Ligação para o cilindro de CO <sub>2</sub> e para o exterior .....   | 35 |
| Figura 3.8 - Variação ao longo do tempo do teor de CO <sub>2</sub> num dispositivo sem sistema de ventilação. ....                            | 36 |
| Figura 3.9 - Variação ao longo do tempo do teor de CO <sub>2</sub> num dispositivo com sistema de ventilação. ....                            | 37 |
| Figura 3.10 - Manómetro regulador do fluxo de CO <sub>2</sub> .....   | 38 |
| Figura 3.11 - Teor de CO <sub>2</sub> ao longo do tempo obtido para um intervalo de 10 segundos de fornecimento.....                          | 38 |
| Figura 3.12 - Teor de CO <sub>2</sub> ao longo do tempo obtido para um intervalo de 20 segundos de fornecimento.....                          | 39 |
| Figura 3.13 - Relação do intervalo de fornecimento de CO <sub>2</sub> e teor obtido. ....   | 39 |
| Figura 3.14 - Esquema representativo do dispositivo final de ensaio acelerado de carbonatação. ....   | 41 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.15 - Dispositivo final de ensaio acelerado de carbonatação no interior do laboratório.<br>.....     | 41 |
| Figura 4.1 - Carotagem e dois tipos de corpos de prova utilizados.....                                       | 44 |
| Figura 4.2 - Ensaio de verificação da resistência a compressão.....  | 46 |
| Figura 4.3 - Ensaio de absorção de água por capilaridade. ....   | 47 |
| Figura 4.4 - Permeâmetro de oxigênio e água.....   | 48 |
| Figura 4.5 - Corpos de prova impermeabilizados lateralmente e célula onde são colocados sob<br>pressão. .... | 49 |
| Figura 4.6 - Profundidade da penetração da água. ....  | 50 |
| Figura 4.7 - Microporosímetro de mercúrio. ....  | 51 |
| Figura 4.8 - Aparelho de ensaio TGA. ....  | 52 |
| Figura 4.9 - Curva típica de ensaio termogravimétrico .....  | 53 |
| Figura 4.10 - Percentagens de perda de massa com análise termogravimétrica (TGA). ....                       | 55 |
| Figura 4.11 - Curva de absorção NFB 10 502.....  | 55 |
| Figura 4.12 - Curva de absorção Norma DIN 52617. ....  | 56 |
| Figura 5.1 - Câmaras de criação de diferentes ambientes de pré-condicionamento. ....                         | 58 |
| Figura 5.2 - Ensaio de carbonatação acelerada. ....  | 61 |
| Figura 5.3 - Medição da profundidade de carbonatação.....  | 61 |
| Figura 5.4 - Medidas da profundidade de carbonatação. ....   | 62 |

# Lista de Quadros

|   |    |
|---|----|
| Quadro 2.1 - Características dos estudos de carbonatação em argamassas realizados por diversos pesquisadores, adaptado..... | 22 |
| Quadro 2.2 - Características de alguns indicadores químicos de pH .....   | 23 |
| Quadro 2.3 - Indicador de fenolftaleína para a medição da carbonatação, adaptado .....                                      | 24 |
| Quadro 2.4 - Classe de exposição, adaptado .....  | 26 |
| Quadro 3.1 - Humidade relativa produzida em cada tipo de solução aquosa sobressaturada .                                    | 31 |
| Quadro 4.1 - Tipos de corpos de prova utilizados nos ensaios.....   | 44 |
| Quadro 4.2 - Quadro síntese de caracterização do betão .....  | 54 |
| Quadro 5.1 - Ambientes criados para o período de pré-condicionamento.....   | 58 |
| Quadro 5.2 - Variação total dos corpos de prova no Ambiente D (HR= 32 ± 3 %).....   | 58 |
| Quadro 5.3 - Variação total dos corpos de prova no Ambiente D (HR= 65 ± 3 %).....   | 59 |
| Quadro 5.4 - Variação total dos corpos de prova no Ambiente D (HR= 75 ± 3 %).....   | 59 |
| Quadro 5.5 - Variação total dos corpos de prova no Ambiente D (HR= 90 ± 3 %).....   | 59 |
| Quadro 5.6 - Condições de exposição a realizar no ensaio acelerado de carbonatação. ....                                    | 60 |
| Quadro 5.7 - Profundidades de carbonatação obtidas nas diferentes condições. ....   | 62 |



# Simbologia

|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| $\text{CO}_2$        | Dióxido de Carbono           |
| $\text{H}_2\text{S}$ | Sulfeto de Hidrogénio        |
| $\text{SO}_2$        | Dióxido de Enxofre           |
| $\text{Ca(OH)}_2$    | Hidróxido de Cálcio          |
| $\text{NaOH}$        | Hidróxido de Sódio           |
| ppm                  | Partes por milhão            |
| $\text{OH}^-$        | Hidróxido                    |
| $\text{Ca}^{2+}$     | Cálcio                       |
| $\text{Na}^+$        | Sódio                        |
| $\text{K}^+$ ,       | Potássio                     |
| $\text{SO}_4^-$ ,    | Sulfato                      |
| C-S-H                | Silicato de Cálcio Hidratado |
| $\text{C}_2\text{S}$ | Silicato Dicálcico           |
| $\text{C}_3\text{S}$ | Silicato tricálcico          |
| a/c                  | Água/cimento                 |
| $^{\circ}\text{C}$   | Graus Celcius                |
| HR                   | Humidade relativa            |



# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento do tema

Actualmente o betão armado é dos materiais mais utilizados na construção civil. É um material com grande aptidão para ser usado em praticamente todo o tipo de obras de construção. Sabe-se que começou a ser utilizado cerca do ano de 1848 e cedo se percebeu que a complementaridade entre o betão e o aço produz um enorme potencial mecânico, que se pode facilmente aliar à estética. Por ser facilmente moldável em diversas formas e tamanhos possibilita permanentemente evoluções das técnicas construtivas.

A forma massiva em que o betão é utilizado em todo o mundo aparenta que o material é totalmente resistente às acções ao longo do tempo. No entanto essa ideia não é verdadeira. Sabemos que o clima no planeta não é regular, varia de local para local. O betão encontra-se aplicado em larga escala por toda a parte, em diferentes ambientes, alguns deles com condições de exposição extremamente desfavoráveis. Tornam-no assim fortemente susceptível a ataques de corrosivos, que levam a que haja redução na durabilidade das estruturas [1]. Com o passar dos anos as construções em betão sofrem alterações consideráveis. Em alguns casos as armaduras começam a sofrer corrosão num espaço de tempo menor do que o programado para a vida útil da estrutura. Desta forma, é importante que a Engenharia Civil desenvolva estudos no sentido de conhecer e compreender as causas que levam à degradação do betão, para posteriormente melhorar a qualidade dos materiais utilizados e desenvolver misturas que prolonguem a longevidade das estruturas. Contudo, na indústria da construção civil ainda são aplicados alguns produtos sem que tenham uma devida avaliação prévia do seu comportamento face a condições ambientais desfavoráveis. Ora, percebe-se que além da investigação em busca de resistência mecânica, também deve haver uma forte necessidade de investigação com inclusão de conceitos de durabilidade acerca do comportamento do betão armado face aos agentes agressores nas mais diversas circunstâncias. Deste modo é possível obter uma previsão rigorosa do tempo de vida útil da estrutura. O tempo de vida útil e durabilidade de uma estrutura são termos associados, o que afecta o período de vida útil afecta também a durabilidade. De entre os agentes agressores que mais afectam a durabilidade das estruturas em betão armado os mais críticos são os que provocam corrosão no “esqueleto” da estrutura. Uma das grandes causas de deterioração das estruturas em betão armado por corrosão das armaduras ocorre devido à acção da carbonatação. Como o nome diz a carbonatação no betão ocorre pela presença de dióxido de carbono na atmosfera.

O enorme consumo de combustíveis fósseis é uma das causas no permanente aumento das concentrações do gás na atmosfera. O consumo é realizado na sua grande maioria pelo sector de produção de energia, como a energia termoeléctrica e pelas indústrias, onde um dos

maiores consumidores é a indústria da construção. O aumento do nível de CO<sub>2</sub> na atmosfera está directamente relacionado com o desenvolvimento industrial. Desde o início na revolução industrial, no séc. XVIII até 2013 que a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera aumentou em cerca de 42 % [2]. Assim, estes dados estatísticos são do interesse da comunidade científica, na pesquisa de um betão mais resistente e apropriável ao fenómeno de carbonatação.

Pode-se dizer que a carbonatação não é um problema directamente para o betão, mas sim para o aço das armaduras. Numa estrutura em betão armado, a camada de recobrimento funciona como uma protecção para as armaduras, comportando-se como um obstáculo físico e químico, devido à elevada alcalinidade. Deste modo forma-se uma película passivadora envolvente do aço. Uma forma de romper essa película passivadora é através da redução da alcalinidade no betão provocada por reacções físico-químicas entre o CO<sub>2</sub> da atmosfera e os produtos gerados pela hidratação do betão. A carbonatação é um grande responsável pela iniciação da corrosão das armaduras [3]. A corrosão das barras de aço das armaduras e os restantes danos desencadeados pelo fenómeno de carbonatação são problemas de dimensão mundial [4].

## **1.2 Objectivos**

O objectivo principal deste trabalho visa elaborar em laboratório um dispositivo capaz de realizar o ensaio acelerado de carbonatação.

Além do principal e mais importante objectivo, o presente trabalho pretende realizar ensaios com corpos de prova em betão, no dispositivo construído. Estes ensaios envolvem diferentes teores de CO<sub>2</sub> e de humidade relativa.

Pretende-se também realizar ensaios de caracterização em corpos de prova de betão utilizados na realização do ensaio acelerado de carbonatação. Posteriormente pretende-se relacionar os resultados obtidos com aspectos que possam influenciar o processo de carbonatação.

## **1.3 Plano de trabalhos e organização da dissertação**

Este trabalho encontra-se organizado por capítulos numerados de um a seis, encontrando-se no final as referências bibliográficas.

No primeiro e presente capítulo é realizado um breve enquadramento do tema, são apresentados os objectivos por onde se rege o trabalho e também descrita a sua organização.

O segundo capítulo é composto por uma análise de conhecimentos bibliográficos acerca dos mecanismos de carbonatação. Inicialmente citando o fenómeno, em que consiste e os factores que o condicionam e a influência que a carbonatação produz nas armaduras de betão armado. Seguidamente é feita uma distinção entre ensaios com condições normais de exposição e ensaios com condições que possibilitam um aceleração do processo. É também caracterizado o ensaio acelerado e feita referencia às diferentes variáveis que podem ser utilizadas na sua execução. São também apresentadas diferentes técnicas que possibilitam a medição da profundidade de carbonatação. No final é exibida uma breve referência da classificação das classes de exposição para corrosão conduzida por carbonatação.

O terceiro capítulo é exibido todo o desenvolvimento efectuado na construção de um dispositivo capaz de realizar ensaios de carbonatação acelerada em laboratório. Iniciando com uma descrição do dispositivo construído inicialmente. São apresentados os materiais que o constituem e a forma como foram unidos. Seguidamente expõem-se a metodologia realizada durante os testes preliminares, foram necessários para controlar as diferentes variáveis presentes no decorrer do ensaio. O teor de CO<sub>2</sub> e humidade relativa. É exibido também o funcionamento necessário para a realização do ensaio acelerado. Por último é apresentado o produto final, resultante de todo o desenvolvimento.

O Quarto é composto pela descrição dos procedimentos de todos os ensaios realizados com os corpos de prova em betão. No início é apresentada uma classificação do betão, e em seguida, toda a metodologia que permite realizar uma caracterização do material.

No quinto capítulo, apresenta-se a metodologia utilizada neste estudo para realização do ensaio acelerado de carbonatação.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e recomendações futuras.



# 2 Mecanismos de carbonatação no Betão

## 2.1 Enquadramento

Sabe-se que o betão armado é um material com uma grande robustez, mas em alguns aspectos ele pode revelar-se frágil. Uma dessas fragilidades é a corrosão das armaduras devido a carbonatação do betão.

Sempre que o betão se encontre num meio contendo dióxido de carbono e água este é susceptível de sofrer carbonatação [5]. A carbonatação do betão é das principais causas da iniciação do processo de corrosão das armaduras [3]. As estruturas em betão armado são mais susceptíveis de deterioração, principalmente quando se encontram em centros de grande ocupação onde se encontram maiores concentrações de gases poluentes.

A carbonatação é um fenómeno físico-químico, resultante de uma reacção entre gases ácidos presentes no ambiente e os constituintes alcalinos resultantes da hidratação do betão. Gases tais como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) em contacto com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), hidróxido de potássio ( $\text{KOH}$ ) e também silicatos alcalinos [6,7]. Os gases mais importantes em ambas as partes são o hidróxido de cálcio e o dióxido de carbono, gás que dentro dos constituintes minoritários da atmosfera é o que se encontra em mais abundância, em média 320 ppm, 0,032% em volume [8]. Para se ter uma ideia da dimensão, o  $\text{CO}_2$  na atmosfera possui uma concentração 10,000 vezes maior que a de  $\text{SO}_2$  [9]. Quanto maior for a concentração do gás no meio, maior é a carbonatação. Num contexto menos abrangente, mas de maior importância do fenómeno, trata-se da formação de carbonato de cálcio, produto resultante da reacção entre o dióxido de carbono e o hidróxido de cálcio, com conseqüente redução do pH e do volume da estrutura porosa do betão [9].

## 2.2 Mecanismo de carbonatação

Na produção de um betão e aquando da hidratação do cimento ocorrem reacções químicas e a partir destas é produzida uma solução alcalina de compostos carbonatáveis. Forma-se uma rede porosa preenchida maioritariamente por íons  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , e  $\text{SO}_4^{2-}$ , resultantes da hidratação dos componentes do cimento (Clínquer Portland) e da formação de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Conferem assim ao betão uma alcalinidade elevada. Este tipo de compostos alcalinos como o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , são consumidos na reacção de carbonatação e provocam alterações na estrutura interna do betão.

A carbonatação é um processo físico-químico de neutralização do  $\text{Ca(OH)}_2$  e de outros compostos alcalinos hidratados. A principal reacção deste fenómeno é uma reacção onde intervém o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{Ca(OH)}_2$ , originando carbonato de cálcio e é dada pela Equação (2.1)



A velocidade com que este processo é realizado está relacionada com factores ambientais e com características intrínsecas do tipo de betão.

A reacção de carbonatação no betão só é possível se houver algum tipo de transporte do  $\text{CO}_2$  presente no ambiente para o interior. O transporte das moléculas de  $\text{CO}_2$  do meio até ao interior é feito por difusão, através dos poros existentes no betão. A difusão é um mecanismo de transporte de massa, por efeito de gradientes de concentração entre dois diferentes meios aquosos, neste caso o meio da solução presente no interior dos poros do betão e o ambiente exterior [10].

A difusão de  $\text{CO}_2$  segue a Lei de Fick de difusão [11]:

$$dx/dt = D_0/x \quad (2.2)$$

Onde:

x - distância da superfície.

t - tempo.

$D_0$  - coeficiente de difusão (dependente do tipo de cimento).

$dx/dt$  - velocidade de avanço da frente de carbonatação.

Esta velocidade é inversamente proporcional à distância da superfície, ou seja, para uma maior profundidade (x), menor é a velocidade de carbonatação [12].

A carbonatação do betão processa-se de forma lenta, apresentando velocidade decrescente ao longo do tempo [13].

O fenómeno da carbonatação pode ser descrito pelas etapas que se apresentam [14]:

- a) Difusão do  $\text{CO}_2$  do meio envolvente para o interior da estrutura porosa do betão.
- b) Dissolução  $\text{Ca(OH)}_2$  sólido formado na hidratação do cimento, Equação (2.3).



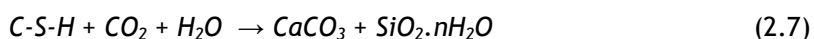
- c) Dissolução do gás na solução aquosa dos poros e formação do íon carbonato, representado pelas Equações (2.4) e (2.5).



- d) Reacção do  $\text{CO}_2$  dissolvido com o  $\text{Ca(OH)}_2$  dissolvido, formando o carbonato de cálcio, Equação (2.6).



- e) Reacção pozolânica do  $\text{CO}_2$  dissolvido com o C-S-H e com compostos não hidratados ( $\text{C}_2\text{S}$  e  $\text{C}_3\text{S}$ ) equação (2.7).



Os compostos não hidratados não reagem com o  $\text{CO}_2$  em condições atmosféricas normais, apenas reagem na presença de altas concentrações [15].

- Redução do volume dos poros devido a produtos oriundos da carbonatação.
- Condensação do vapor de água produzido na reacção e início de equilíbrio com as condições do meio exterior (temperatura e humidade) a que o betão está exposto.

Numa primeira fase do processo o  $\text{CO}_2$  difunde-se, alcançando o interior do betão, reagindo depois com as moléculas de água existentes e, posteriormente resulta ácido carbónico que reage com os compostos alcalinos do betão [16].

As reacções da carbonatação atrás descritas provocam uma redução do valor de pH, inicialmente com valores cerca dos 13 para valores que podem ser inferiores a 9. Quando o  $\text{Ca(OH)}_2$  está totalmente carbonatado o pH pode alcançar valores de pH próximos de 8,3 [17]. Os valores iniciais de pH do betão são devidos em grande parte ao  $\text{Ca(OH)}_2$  presente e ao longo do processo de carbonatação vai havendo um desaparecimento do  $\text{Ca(OH)}_2$ , facto que provoca a diminuição do valor de pH. O esquema apresentado Figura 2.1 exhibe um esquema representativo do desenvolvimento do fenómeno de carbonatação no betão.

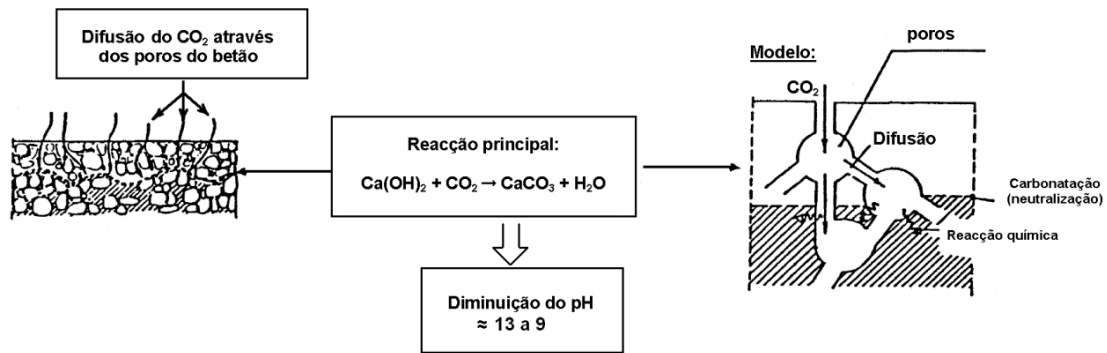


Figura 2.1 - Avanço do processo de carbonatação [18].

Deste modo podem-se distinguir três zonamentos diferentes no interior do betão, Figura 2.2 [19]:

- A zona carbonatada (região onde o  $\text{Ca(OH)}_2$  deu origem a  $\text{CaCO}_3$ ).
- A zona não carbonatada (região ainda não alcançada pelo  $\text{CO}_2$ ).
- A zona intermédia ou frente de carbonatação (região onde se processa a reacção de carbonatação).

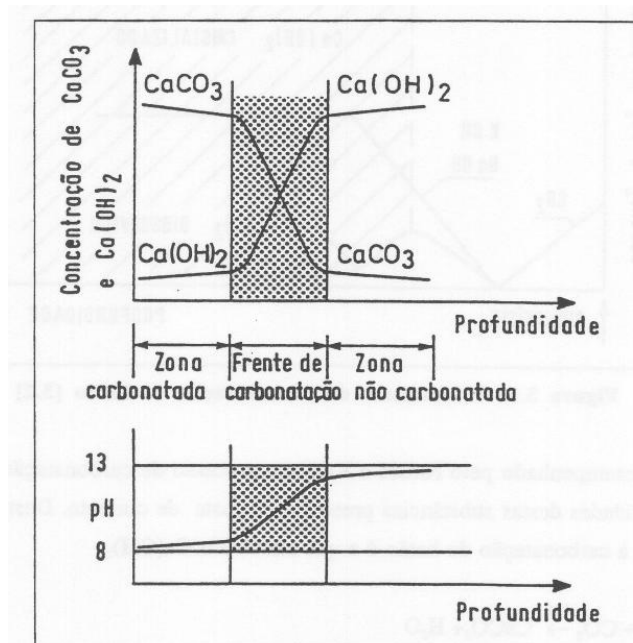


Figura 2.2- Zonas envolvidas no mecanismo de carbonatação e variação do pH ao longo da profundidade [19].

Podem ser retirados alguns aspectos favoráveis da reacção de carbonatação. A transformação de  $\text{Ca(OH)}_2$  em  $\text{CaCO}_3$ , compostos muito insolúveis conferem ao betão uma redução da porosidade, aumentando a resistência mecânica e resistência a posteriores ataques químicos.

## 2.3 Factores que influenciam a carbonatação

A profundidade e velocidade de carbonatação no betão são influenciadas por alguns factores, tais como a relação água cimento (a/c), o grau de hidratação, o tipo de cimento, concentração de dióxido de carbono, temperatura, humidade relativa entre outros. Podem ser divididos em factores externos (relacionados com as condições de exposição), de destacar a concentração de CO<sub>2</sub> e a humidade relativa e factores internos (relacionados com as características do próprio betão).

### 2.3.1 Factores externos

#### 2.3.1.1 Concentração de CO<sub>2</sub>

A concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente é dos factores variáveis que mais influenciam a taxa de carbonatação das estruturas em betão armado.

Como já foi referido, a concentração de CO<sub>2</sub> representa cerca de 0,032% do volume da concentração total na atmosfera em condições normais [8]. A concentração de CO<sub>2</sub> varia entre 0,03 % a 0,05 % em atmosferas rurais, 0,10 % a 1,20 % em centros urbanos e em certos depósitos de material a granel poderá chegar a 1,8 %. Alguns autores referem que o teor de CO<sub>2</sub> é muito importante na taxa de carbonatação e apresentam as concentrações habituais nos seguintes ambientes de alguns ambientes [10,13,20,].

|                                   |         |
|-----------------------------------|---------|
| a) Campo aberto                   | 0,015 % |
| b) Centro urbano                  | 0,036 % |
| c) Zona industrial                | 0,045 % |
| d) Estábulo ventilado             | 0,046 % |
| e) Estábulo                       | 0,075 % |
| f) Exaustão de veículo motorizado | 16,69 % |
| g) Respiração humana              | 3,62 %  |

/São visíveis ligeiras variações de valores de concentração, quando comparando ambientes abertos e ambientes fechados, sendo maior a concentração em ambientes fechados, ambientes onde é mais difícil renovar o ar. Outro factor que faz também aumentar a concentração de CO<sub>2</sub> é a existência de plantas, humanos, máquinas e ambientes específicos como garagens ou túneis [21,22].

A concentração de CO<sub>2</sub> presente no ambiente é de grande importância na profundidade e velocidade de carbonatação em estruturas em betão, quanto maior for o gradiente de

concentração entre o meio exterior e o meio interior do betão, maior é a velocidade e a profundidade de carbonatação [11,21].

### 2.3.1.2 Humidade Relativa

Outro importante factor relacionado com o meio ambiente que influencia a velocidade de carbonatação do betão é a humidade relativa. O betão é um material com grande poder de retenção de água, maior que a capacidade de a dissipar. Sendo assim, todos os processos físico-químicos presentes no fenómeno de carbonatação acontecem com água no interior dos poros do betão [23]. A velocidade de carbonatação e a penetração de  $\text{CO}_2$  no betão estão directamente relacionadas com o teor de humidade relativa e por consequência no grau de saturação do próprio betão. A água tem um papel duplo no fenómeno de carbonatação. Num meio líquido, a difusão do  $\text{CO}_2$  processa-se mais lentamente, na ordem de 104 vezes menor comparativamente ao meio gasoso [24]. Ou seja, com um teor de humidade relativa muito elevado, ou mesmo saturado (Figura 2.3 b), a difusão do  $\text{CO}_2$  praticamente não ocorre [24]. Contudo, se o ambiente for seco (Figura 2.3 a), não existe água para que haja dissolução do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e do  $\text{CO}_2$ , logo a velocidade de carbonatação é extremamente lenta ou poderá nem acontecer [24]. Algumas investigações referem que por mais que se aumente a concentração de  $\text{CO}_2$ , se a humidade relativa não se encontrar dentro de um determinado intervalo de concentração, a velocidade de carbonatação não tem nenhum incremento [14]. A máxima velocidade de carbonatação pode ser obtida numa situação de humidade relativa intermédia Figura 2.3 c), onde é propícia, simultaneamente, a difusão e dissolução de  $\text{CO}_2$ , como se pode verificar na Figura 2.3 [5]. Com os poros do betão parcialmente saturados, a difusão de  $\text{CO}_2$  é facilitada e torna-se então na condição mais favorável para que os compostos resultantes do cimento hidratado sofram carbonatação, resultando então a situação de maior risco da corrosão do aço nas estruturas de betão armado [25].

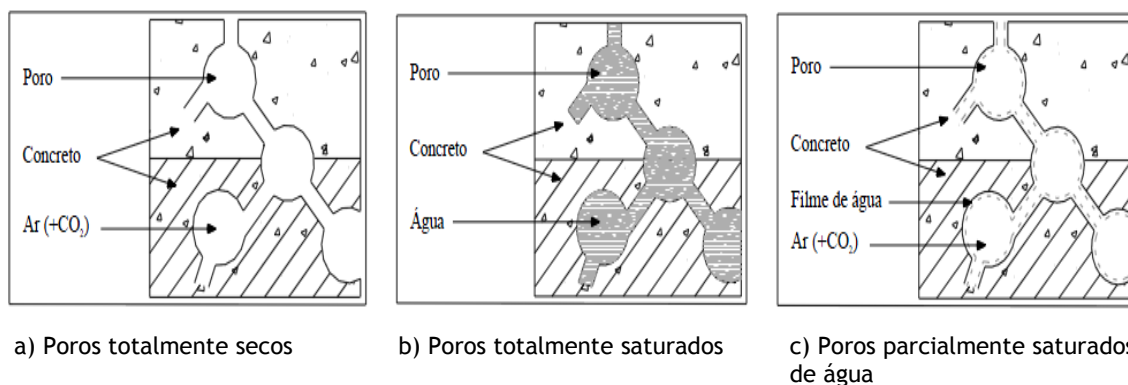


Figura 2.3 - Representação esquemática da difusão do  $\text{CO}_2$  [25].

Neste factor de influência no fenómeno de carbonatação, há várias opiniões nas diferentes pesquisas realizadas. Cada estudo refere um intervalo de humidade relativa ideal para a ocorrência das reacções de carbonatação, mas em geral todos os pesquisadores apontam para valores compreendidos entre 40 % e 85 % de humidade relativa [23,26,27]. De uma forma geral, e para muitos autores, a relação entre o grau de carbonatação e a humidade tem a forma de uma parábola, sendo diferente apenas a variação do ponto máximo no eixo das abcissas, Figura 2.4.

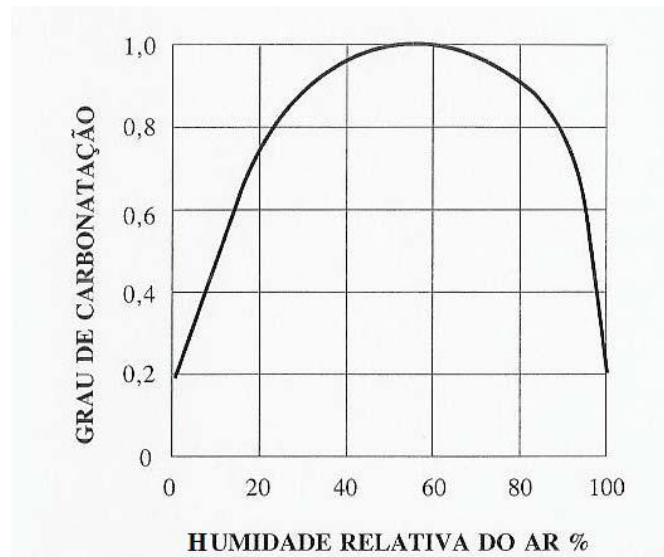


Figura 2.4 - Representação de grau de carbonatação em função da humidade relativa [28].

### 2.3.1.3 Temperatura

É certo que a variação de temperatura tem grande influência nas taxas de reacções químicas, onde um aumento de temperatura conduz a um aumento da taxa de reacções químicas. No que toca à influência da temperatura na velocidade de carbonatação no betão as opiniões não são tão unânimes como em relação aos factores anteriormente referidos. Num intervalo de variação de temperatura entre 20 °C e 40 °C, a temperatura não exerce influência na carbonatação [14], é controlada por outros factores, tais como concentração de CO<sub>2</sub> e humidade relativa, factores importantíssimos para a difusão do CO<sub>2</sub>. Neville [13], refere que pequenas variações de temperatura não afectam a carbonatação, mas em superfícies expostas à luz solar, onde ocorrem grandes variações de temperatura, esta tem influência na taxa de carbonatação [17]. Ao contrário do que foi antes mencionado, há autores que defendem que a temperatura tem influência na profundidade de carbonatação [29]. Foi verificado que para betões da mesma classe de resistência à compressão no ambiente de Singapura onde a temperatura média é de 28 °C, a profundidade de carbonatação registada foi cerca de 70 % maior do que no Reino Unido onde a temperatura média é cerca de 8 a 9 °C [29]. Se a temperatura não tem influência directa na velocidade e profundidade de

carbonatação tem indirectamente, porque tal como é conhecido, a temperatura é um facto regulador da percentagem de água por volume que o ar pode conter.

### **2.3.2 Factores internos**

Além das características relativas ao ambiente, também as características do betão tem grande influência no processo de carbonatação. A variação destes factores são na maior parte dos trabalhos de investigação o caso principal de estudo, para obtenção de betões que possam oferecer maior resistência à carbonatação.

#### **2.3.2.1 Porosidade**

Na estrutura porosa do betão, tamanho e disposição dos poros são parâmetros resultantes a partir da razão água/cimento. Papadakis [14], menciona que usando o mesmo tipo de cimento, a distribuição dos poros é dependente à priori pela razão a/c. A razão a/c é a responsável pelas propriedades da microestrutura do cimento endurecido. Aumentando a razão a/c aumenta-se a porosidade, a difusão de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, a velocidade de carbonatação [14]. Reduzindo a mesma razão, mais compacto e resistente será o betão ao progresso da frente de carbonatação.

Através de ensaios de intrusão de mercúrio verificou-se que as maiores profundidades de carbonatação foram registadas em betão com maior tamanho médio de poros [30]. Há uma distinção entre porosidade e permeabilidade, porque para a permeabilidade apenas alguns poros contribuem [13]. A porosidade é definida pelo volume de vazios que uma amostra possui e a permeabilidade está relacionada com o escoamento de fluidos. Se esses vazios forem interligados, então poder-se-á relacionar estes dois conceitos, caso contrário não é possível, Figura 2.5. A porosidade afecta o grau de carbonatação do betão e alguns investigadores comprovaram que o contrário também. Devido à carbonatação há uma redução média de diâmetro dos poros e conseqüente redução da porosidade [31,32,33]. Das reacções químicas de hidratação e carbonatação resultam volumes de sólidos, reduzindo o grau de porosidade. Um aumento de porosidade implica maior velocidade e profundidade de carbonatação, seguindo-se uma redução do número e tamanho dos poros devido ao depósito de material sólido resultante da carbonatação, aumenta a compacidade do betão, dificultando a difusão de CO<sub>2</sub> para o interior do betão ao longo do tempo [34].

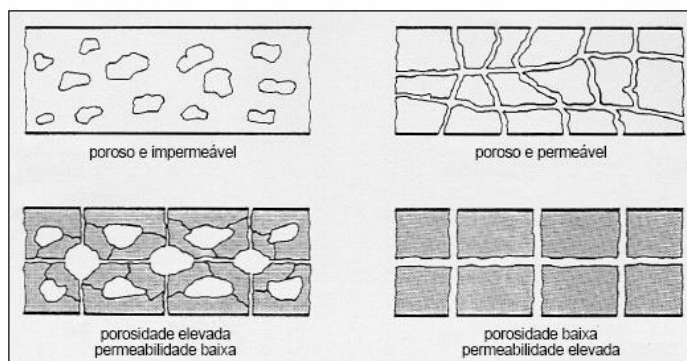


Figura 2.5 - Diferenças entre permeabilidade e porosidade [35].

### 2.3.2.2 Cura

Vários autores mencionam a cura do betão como um dos factores internos mais influentes no processo de carbonatação. A dimensão e continuidade dos poros por onde irá ser conduzido o CO<sub>2</sub> para o interior do betão, pode ser controlado através da cura. Para alguns autores a profundidade de carbonatação está dependente deste factor. Se o tempo de cura for maior, maior é o grau de hidratação do cimento. Desta forma menor será a porosidade e permeabilidade, logo menor será a carbonatação [35].

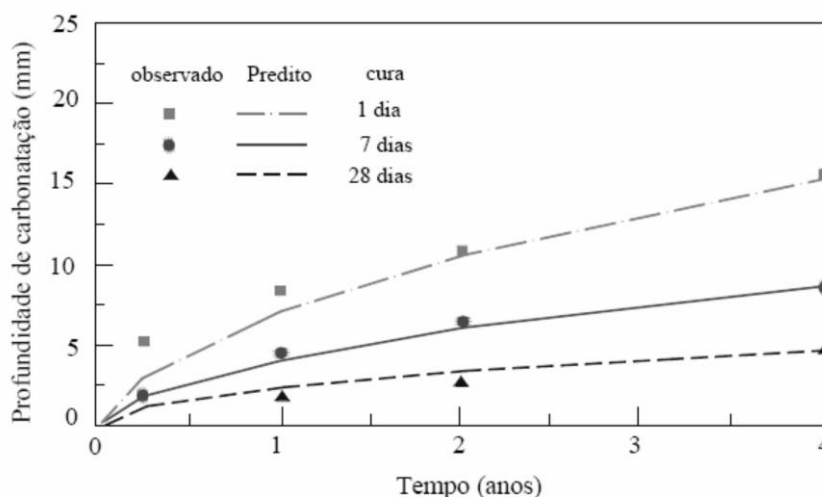


Figura 2.6 - Influência da cura na profundidade de carbonatação [36].

Num estudo realizado por THOMAS e MATTHEWS, foi avaliada a influência da cura na profundidade de carbonatação e constataram que em betões com maior tempo de cura havia uma redução da profundidade de carbonatação, como se pode ver pela figura seguinte [36].

A profundidade de carbonatação também é dependente da cura, ou seja, esta tem influencia as condições de hidratação nos milímetros superficiais do betão [10]. No caso de ocorrer uma

cura imprópria gera-se a possibilidade de maior ocorrência de carbonatação na estrutura, mais facilmente ocorre a difusão de  $\text{CO}_2$  do exterior para o interior do betão.

Uma cura húmida (HR=100 %) reduz a profundidade de carbonatação entre 35 % e 70 % para uma cura seca (HR=65%) [37].

Se a cura for realizada ao ar formam-se poros de maiores dimensões e mais canais intercomunicáveis que por sua vez possibilitam um aumento da velocidade de difusão do  $\text{CO}_2$  [38]. Uma cura húmida, morosa, torna-se significativamente favorável à hidratação do cimento, a uma diminuição do tamanho dos poros que por consequência leva a uma menor profundidade de carbonatação. A cura tem uma importância fundamental na formação de  $\text{Ca(OH)}_2$  durante as reacções de hidratação do cimento e quanto maior for o tempo de cura maior é a quantidade de formação de  $\text{Ca(OH)}_2$  e mesmo que algum seja consumido nas reacções irá haver sempre um teor restante com a função de criar uma reserva alcalina para garantir a alcalinidade do betão ao longo do tempo.

### 2.3.2.3 Adições

Têm sido utilizadas adições minerais nos betões de modo a obter vantagens económicas e técnicas na produção. Entre as vantagens do uso de adições encontra-se a densificação da matriz dos poros, a redução da permeabilidade e uma maior resistência à compressão. No entanto, uma das principais desvantagens é a carbonatação.

Através das adições obtém-se um betão com menor teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  e através da redução deste composto o betão reduz a capacidade de fixação  $\text{CO}_2$  ficando assim mais susceptível à carbonatação.

A diminuição do grau de porosidade é uma vantagem para o betão uma vez que dificulta o processo da difusão do  $\text{CO}_2$  [5]. Vários estudos apontam que nas mesmas condições de exposição, os cimentos com adições apresentam uma menor resistência ao processo de carbonatação que os cimentos Portland desprovidos de qualquer tipo de adição.

A quantidade de compostos alcalinos presentes no betão que reagem com o  $\text{CO}_2$  é dependente do tipo de adições e do tipo de cimento utilizado.

As pozolanas contêm os mesmos componentes que o clínquer, são extremamente ricas em  $\text{SiO}_2$  e carentes em  $\text{CaO}$ . Devido a este facto há uma maior quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  produzido, levando a que a velocidade de carbonatação seja maior [14].

As reacções pozolânicas consomem o  $\text{Ca(OH)}_2$  e reduzem o pH da solução dos poros, facilitando a penetração da carbonatação.

Num estudo realizado foi substituída a fracção do cimento por sílica activa e cinza volante, também parte do agregado pequeno pelos mesmos constituintes. Verificou-se que quando a substituição é feita no cimento, a carbonatação aumenta 18 % com a sílica activa e 50 % com as cinzas volantes, mas quando a substituição é feita nos agregados, a carbonatação diminui

cerca de 25 % com sílica activa e entre 25 a 50 % com cinzas volantes, intervalo dependente do tipo de composto pozolânico utilizado [39].

Em estudos realizados com escória de alto-forno foi obtida maior profundidade de carbonatação com o aumento do teor em escória, mas menor profundidade ao aumentar a classe de resistência, Figura 2.7 [40,41].

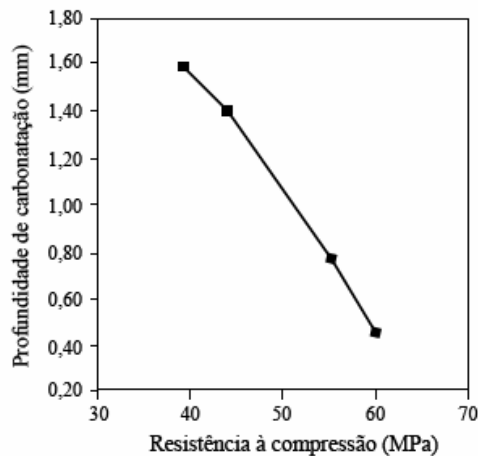


Figura 2.7 - Relação entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão aos 28 dias [41].

Numa comparação entre três tipos de cimentos (CP-IS, CP III e CP IV), registou-se no (CP- III) o pior desempenho de resistência à carbonatação, pois este possui adição de escória de alto forno, não verificando qualquer vantagens no refinamento da matriz porosa [42].

Em cimentos com adições há uma menor reserva alcalina no betão e ao mesmo tempo um refinamento da estrutura porosa o que leva a concluir que tem que se ter em consideração não só o efeito físico, mas também o efeito químico.

O efeito produzido pelas adições minerais no cimento Portland depende da metodologia da mistura, ou seja, se se trata de adição ou de substituição. Se houver adição de cinza volante sem a redução do teor de cimento, há uma conseqüente diminuição da penetração de  $\text{CO}_2$ , caso contrário se houver substituição das mesmas cinzas pelo cimento e com a mesma relação a/c, há um aumento da velocidade de carbonatação, Figura 2.8 [43,44,45].

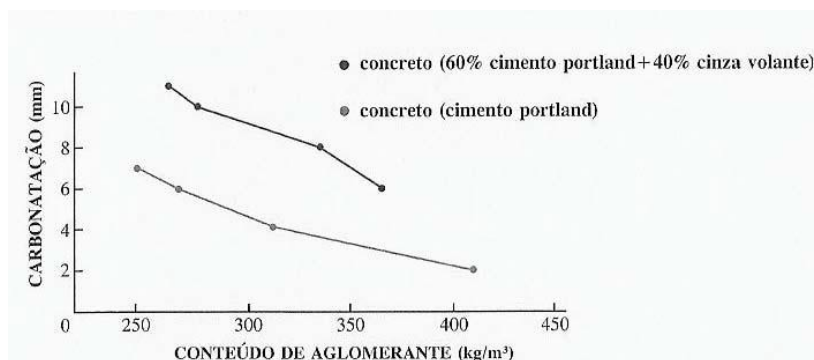


Figura 2.8 - Influência das adições sobre a profundidade de carbonatação [35].

#### 2.3.2.4 Fissuração

A fissuração é outro importante factor a ter em conta no fenómeno da carbonatação. A fissuração ocorre no betão devido a diferentes causas: assentamentos diferenciais da estrutura, variações de temperatura e também quando ocorre retracção do betão.

Através das fissuras criadas, o  $\text{CO}_2$  penetra muito mais rapidamente e é capaz de alcançar maiores profundidades num menor intervalo de tempo, também a superfície de contacto com o exterior se torna maior. A Figura 2.9 representa esquematicamente o processo de penetração e difusão de  $\text{CO}_2$  através de uma fissura.

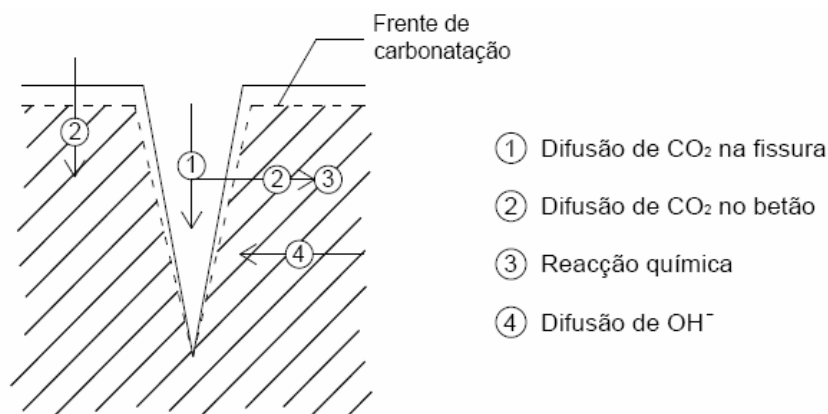


Figura 2.9 - Esquema de carbonatação através de uma fenda [35].

## 2.4 Influência da carbonatação nas armaduras

Não sendo a causa principal causa de deterioração, a carbonatação assume um papel de relevância na durabilidade das estruturas.

As armaduras, conhecidas como o esqueleto, têm grande importância na resistência, durabilidade, longevidade das estruturas de betão armado. Neste ponto apresenta-se uma breve síntese do efeito da carbonatação nas armaduras do betão armado. A durabilidade de uma estrutura de betão armado pode ser extremamente dependente do aço quando o betão não exerce correctamente a sua função protectora [46]. Como mencionado anteriormente, o betão é um meio muito básico com valores de pH entre 12,5 a 13,5, resultante da hidratação do cimento, onde é formado o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e este ambiente forma então uma película envolvente que exerce uma função protectora: as armaduras [47]. Este processo é chamado passivação, designação devida à elevada alcalinidade presente [46]. A película formada confere ao ferro uma protecção que impede a dissolução do mesmo, sendo constituída por compostos complexos de ferro e cálcio que contêm iões de  $\text{OH}^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$ , óxidos de ferro,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e também  $\text{H}_2\text{O}$ . Com isto forma-se então um impedimento de contacto com os meios agressivos do exterior com a armadura [46].

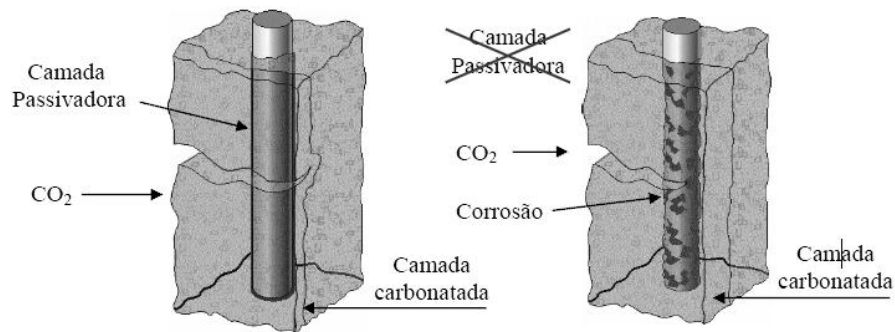


Figura 2.10 - Representação do avanço da frente de carbonatação [48].

O fenómeno de carbonatação só se torna um agente agressivo para as armaduras a partir do momento em que a frente de carbonatação atinge toda a profundidade do recobrimento, aí, e com uma diminuição do valor do pH para valores próximos de 8, ocorre a despassivação das armaduras e formam-se produtos de corrosão, Figura 2.10 [9,48].

Há alguma discórdia em relação ao valor de pH necessário para a permanência da película de passivação das armaduras. Alguns autores dizem que o valor necessário é  $\text{pH} < 9$  [25,50,51], enquanto que outros referem que cerca de um valor de pH de 11,5 ocorre precipitação  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e também a despassivação da película protectora das armaduras [52,53,54]. Não sendo o principal responsável pela deterioração das estruturas, a carbonatação assume um papel importante, reduz o pH da solução no interior dos poros que faz com que a película passivadora do aço seja removida e daí resulta o processo de corrosão das armaduras [13]. Neste processo, os estudos realizados sobre o tema definem duas fases do processo de corrosão. Uma primeira relativa à penetração dos agentes agressivos através da espessura de recobrimento e da concentração na interface armadura/betão, provocando a destruição da película de protecção passiva, denominada de fase de iniciação. E uma segunda fase, a fase de propagação, relativa ao processo de corrosão das armaduras, Figura 2.11.

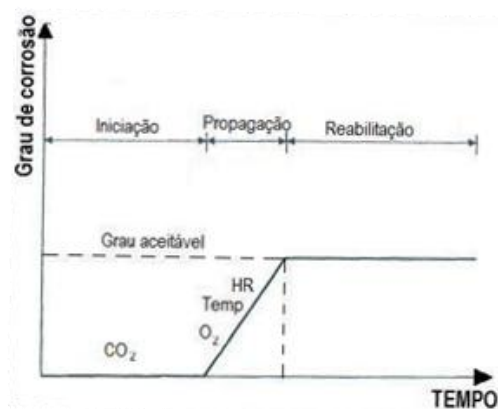


Figura 2.11 - Gráfico simplificado do desenvolvimento da corrosão no tempo [3].

## 2.5 Ensaio de Carbonatação

A comunidade científica sabe agora que é importante valorizar a temática de durabilidade dos materiais. São realizados estudos de durabilidade para conhecer os mecanismos de deterioração das estruturas, tendo em conta os meios agressivos e as características próprias do betão. Devido a esses estudos é possível agora identificar os factores que influenciam a carbonatação. A cura, a porosidade, o ambiente de exposição, o tipo de adições, são alguns dos factores que intervêm no fenómeno de carbonatação e, em geral, na durabilidade do betão.

Assim, através de ensaios laboratoriais, é possível avaliar a durabilidade do betão fazendo variar os vários factores, na procura de melhorar as características do material. Geralmente este tipo de resultados são obtidos através de ensaios acelerados, porque são ensaios de curta duração.

Por outro lado, também são realizados ensaios normais, ditos não acelerados, para a previsão da vida útil da estrutura, onde a previsão obtida é fruto de uma relação entre os resultados obtidos em estruturas já existentes expostas em ambiente natural.

### 2.5.1 Métodos de ensaios

Para avaliação do comportamento do betão podem ser utilizados dois tipos de ensaio. Os ensaios de carbonatação natural e os ensaios de carbonatação acelerada.

#### 2.5.1.1 Ensaio ao natural

Os ensaios naturais, que também podem ser designados por ensaios de longa duração ou até mesmo ensaios não acelerados, têm como princípio básico criar ambientes de degradação natural, para exposição de corpos de prova de materiais, dependendo do uso a que se destinam [55].

Este tipo de ensaios é pouco utilizado nas pesquisas sobre carbonatação devido ao tempo requerido na obtenção de resultados. Os resultados obtidos em ensaios naturais são na grande maioria utilizados para correlacionar com resultados provenientes de ensaios acelerados, para assim se definirem coeficientes de aceleração e prever a velocidade profundidade de carbonatação [27]

Existem algumas vantagens em realizar ensaios ao natural ao invés dos acelerados. A exposição aos ambientes, bem como a acção dos agentes agressivos são de carácter real, contudo os materiais não são ensaiados na configuração de uso nem são considerados os factores que daí advêm conjugados com os factores ambientais. Também não são representativos das variações das condições de exposição, tornando-se difícil prever a vida útil das estruturas [56].

Em relação ao fenómeno da carbonatação em ensaios ao natural é de referir que existe pouca bibliografia existente [27].

A autora menciona também é necessário ter particular cuidado quando se relaciona ensaios acelerados e ao natural. Os coeficientes de aceleração resultantes dos ensaios traduzem o comportamento do material para determinadas condições de ensaio, sendo impossível generalizar com outras pesquisas.

Como já referido anteriormente, são vários factores que podem influenciar o processo de carbonatação. Dos casos estudo até então realizados verifica-se que não existe uma padronização dos ensaios e assim os resultados obtidos em cada pesquisa não serão facilmente comparáveis entre si [23].

A idade e tipo de cura, uso de adições minerais, tipo de cimento, relação a/c. (factores internos), são alguns dos parâmetros que têm sido estudados através de ensaios acelerados de carbonatação. Além destes, também há variação dos factores externos, concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura e HR possibilitando uma quantidade infindável de ensaios possíveis de se realizar. Acerca do assunto muito já foi estudado, mas os padrões empregados em cada caso são os mais variados possíveis [27].

Torna-se então difícil conseguir relacionar e comparar os resultados de estudos diferentes.

#### **2.5.1.2 Ensaios acelerados**

Os ensaios acelerados são ensaios capazes de simular a deterioração natural de um material, com a diferença dessa deterioração de possuir uma intensidade superior, ou seja é reproduzida num menor intervalo de tempo. Estes ensaios são desenvolvidos em laboratório e têm o objectivo de reduzir o tempo real necessário a um grau de degradação específico. Este método de ensaio foi introduzido em 1878 com a norma ASTM E632 [57], aplicada a componentes da construção. Este tipo de ensaio provoca propositadamente no material uma degradação através de taxas que aceleram o processo e tem valores acima das esperadas em serviço. Por exemplo, como é baixa a concentração de CO<sub>2</sub> presente na atmosfera, o ensaio de carbonatação acelerado torna-se muito importante devido á capacidade de reproduzir os

efeitos provocados pelo CO<sub>2</sub> em tempo reduzido. Existem dois tipos de ensaios de envelhecimento acelerados [58]. Um tipo onde não é considerado o desgaste associado ao uso do material na avaliação da durabilidade e outro onde a avaliação da durabilidade tem consideração do factor de aceleração às condições de uso do material.

Aplicando este tipo de ensaios ao betão, o primeiro grupo referido possibilita condições idênticas de exposição e comparação dos resultados obtidos com um betão padrão. Os ensaios do segundo tipo consideram factor de aceleração relativo as condições de uso e estimam um valor de vida útil, fornecido através de uma relação entre o factor de aceleração e a deterioração apresentada do material em laboratório (ensaio acelerado) com a deterioração esperada in-situ (ensaio natural).

Os ensaios acelerados são na maioria utilizados para análise comparativa da durabilidade de diferentes composições, em condições idênticas de exposição para os materiais [27].

## 2.5.2 Ensaios acelerados de carbonatação

O teor de CO<sub>2</sub> existente na atmosfera é pequeno, podendo levar nas condições naturais larguíssimos meses até se obter uma avaliação do comportamento da estrutura de betão face a carbonatação. Sendo a carbonatação um fenómeno extremamente lento, a maioria das pesquisas utilizam o ensaio de carbonatação acelerada para avaliar os seus efeitos. Dados de um estudo demonstraram que uma exposição de um betão a um teor de CO<sub>2</sub> de 4 % durante uma semana é equivalente a uma exposição durante um ano em um ambiente natural [41]. Possan [55], obteve uma relação entre carbonatação natural e carbonatação acelerada, Figura 2.12.

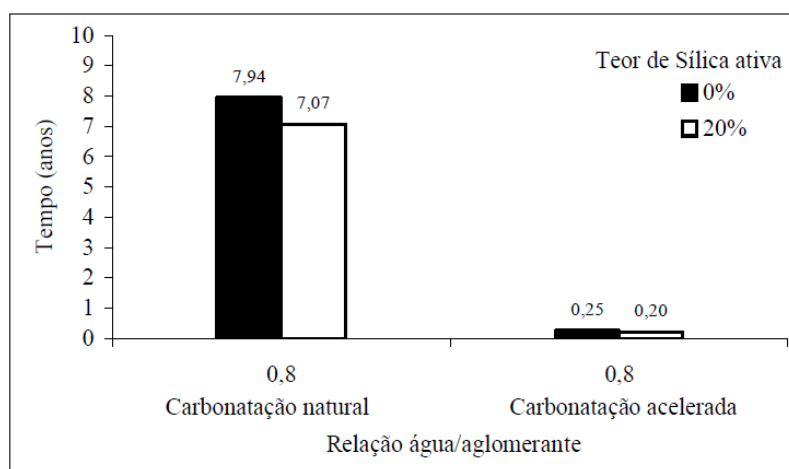


Figura 2.12 - Representação do tempo correspondente do ensaio acelerado para o natural que a profundidade de carbonatação seja de 15 mm [55].

Os ensaios acelerados pretendem simular as condições mais favoráveis para o desenvolvimento da carbonatação, controlando as variáveis que a afectam para que os resultados sejam obtidos em menos tempo possível [27]. A realização de ensaios acelerados de carbonatação consiste em preparar provetes em betão para posteriormente colocar dentro de uma câmara de carbonatação acelerada com condições de temperatura, humidade relativa e concentração de CO<sub>2</sub> controladas. As concentrações que se impõem são bastante superiores às existentes num ambiente exterior comum. Também os resultados obtidos, as profundidades de carbonatação em laboratório são naturalmente superiores ao que seriam registados em condições naturais.

Estes tipos de ensaios são realizados com meios específicos, câmaras de carbonatação, e onde através dos dados dos ensaios realizados é possível obter informações e previsões relevantes do comportamento do betão, quando exposto às mais variadas condições de utilização. Se estes ensaios forem executados e interpretados convenientemente, poderão ser uma credível previsão do comportamento do betão no seu período de vida útil [5].

Os ensaios de carbonatação acelerada além de se poderem simular ensaios de longa duração em curto espaço de tempo também permitem ter um rigoroso controlo do ambiente de exposição e muita precisão na tomada de medidas, devido ao uso de equipamentos sofisticados e desenvolvidos tecnologicamente na monitorização. Alguns autores defendem extremamente este tipo de ensaio considerando-o insubstituível para o estudo de durabilidade de materiais novos.

Nas pesquisas sobre ensaios acelerados de carbonatação são utilizadas concentrações de CO<sub>2</sub> que variam entre 1 % e 100 %. Assim há bastantes dúvidas ainda em determinar a percentagem ideal para a realização deste tipo de ensaios [27]. O Quadro 2.1 demonstra um resumo de estudos realizados por Pauletti [23,26,27], onde é possível verificar a falta de padronização presente em ensaios de carbonatação acelerados.

As diferenças podem ir de forma e dimensão e forma dos corpos de prova, o tipo de cura, o teor de CO<sub>2</sub>, entre outras. As diferenças entre cada autor são tão acentuadas que formam uma quantidade ínfima de combinações de parâmetros, sendo difficilíssimo normalizar o procedimento de ensaio e também se gera uma problemática onde se torna também difícil de relacionar os resultados obtidos de diferentes pesquisas.

**Quadro 2.1 - Características dos estudos de carbonatação em argamassas realizados por diversos pesquisadores, adaptado, [23,27].**

| Pesquisador      | Ano   | Amostras forma/dim   | a/agl       | Tipo de cura Tempo de cura (dias) | Sazonamento Tempo/Local          | UR(%)               | T(C)          | CO2         | Tempo de exposição (dias)          |
|------------------|-------|----------------------|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------|-------------|------------------------------------|
| Tuutti           | 1982  | -                    | 0,40 e 0,70 | submersa (7)                      | 6 meses laboratório              | 80                  | -             | 1           | 90                                 |
| Ho e Lewis       | 1987  | prismas 75x75x300    | -           | húmida (1, 77, 28, 91 e 365)      | 21 dias laboratório              | 50                  | 23            | 4           | 7, 28, 63 e 112                    |
| Fattuhi          | 1988  | prismas 50x50x285    | -           | submersa/ao ar (28)               | Não                              | entre 50 e 70       | entre 20 e 26 | 100         | -                                  |
| Dhir et al.      | 1989  | cubos 100            | -           | húmida/ao ar (28)                 | 14 dias laboratório              | 50                  | 20            | 4           | 140                                |
| Ohga e Nagataki  | 1989  | prismas 100x100x300  | -           | submersa (7,28 e 90)              | Não                              | 50                  | 40            | 7           | a cada 7 dias                      |
| Papadakis et al. | 1991b | prismas 100x100x300  | 0,50 a 0,80 | húmida (90)                       | estufa                           | -                   | -             | 50          | 1, 3, 5, 10, 15 e 20               |
| Branca et al.    | 1993  | cubos 100            | 0,35 a 0,65 | húmida (7)                        | -                                | 75                  | 20            | 30          | -                                  |
| Nepomuceno       | 1992  | prismas 20x55x80     | -           | húmida/ao ar (1, 7 e 28)          | 70 dias laboratório              | entre 50 e 75       | 20            | 100         | variável                           |
| Isaia            | 1995  | cilindros 100x100    | 0,30 a 0,50 | húmida 7                          | 28 dias laboratório              | -                   | -             | 10          | 28, 56, 84 e 112                   |
| Balayssac et al. | 1995  | cilindros 110x100    | -           | submersa (1, 3 e 28)              | -                                | 60                  | 20            | 0,03        | -                                  |
| Roy et al.       | 1999  | prismas 100x100x500  | 0,55 a 0,75 | submersa (7)                      | Não                              | 52, 64, 75, 84 e 92 | -             | 6           | 7, 28, 56 e 112                    |
| Vagheti          | 1999  | cilindros 100x100    | 0,35 a 0,55 | húmida (7)                        | 21 e 84 laboratório              | entre 50 e 80       | 23            | 10          | 28, 56, 84 e 112                   |
| Lopes            | 1999  | cilindros 100x200    | 0,38 a 0,48 | húmida (7 e 28)                   | 22 e 43 laboratório              | 55                  | 27            | 100         | 7, 14, 21, 28 e 35                 |
| Alves            | 2000  | cilindro 100x70      | 0,35 a 0,65 | húmida (7)                        | 21 dias laboratório              | 80                  | 24            | 5           | 28, 56 e 84                        |
| Jiang et al.     | 2000  | prismas 100x100x200  | -           | -                                 | Não                              | 70                  | 20            | 20          | -                                  |
| Cunha e Helene   | 2001  | prismas 279x1152x114 | 0,35 a 0,65 | húmida (28)                       | 15 dias laboratório              | 65                  | 23,5          | 100         | 2h/2h(a/c=0,35)<br>4h/4h(a/c=0,65) |
| Sanjuán e Olmo   | 2001  | cilindros 75x150     | -           | submersa (28)                     | -                                | 70                  | -             | 5, 20 e 100 | -                                  |
| Venquiaruto      | 2002  | cilindros 100x70     | 0,35 a 0,65 | húmida (7)                        | 35 dias laboratório/estufa       | 75                  | 23            | 5           | 28, 56, 84                         |
| Kulakowski       | 2002  | prismas 100x100x300  | 0,30 a 0,80 | húmida amostras embaladas (14)    | 14 dias camara sazonal           | 70                  | 25            | 5           | 35, 56, 91 e 126                   |
| Lo e Lee         | 2002  | cilindros 100x200    | 0,38 a 0,54 | submersas/ao ar (28)              | -                                | -                   | 21            | 2           | 30, 60 e 90                        |
| Coelho et al.    | 2002  | cilindros 100x200    | -           | húmida (28)                       | 35 dias laboratório/estufa RILEM | entre 60 e 70       | 26            | 100         | 77 e 91                            |
| Sperb            | 2003  | Cilindros 100x70     | 0,35 a 0,55 | húmida (7)                        | RILEM                            | 75                  | 23            | 10          | 4, 8, 12 semanas                   |
| kirchheim        | 2003  | prismas 60x60x180    | 0,40 a 0,60 | húmida (28)                       | até constancia camara de sazonal | 70                  | 25            | 100         | -                                  |
| Abreu            | 2004  | prismas 100x100x60   | 0,44 a 0,65 | húmida (28)                       | 32 dias camara de sazonal        | 70                  | 25            | 5 e <50     | 63 e 195                           |
| Thiery           | 2005  | Cilindros 50-100x110 | 0,48 a 0,84 | húmida (91)                       | 45 °C por 30 dias                | 53                  | 21            | 50          | 30,60 e 90                         |

## 2.6 Técnicas de medição da profundidade da carbonatação

A profundidade de carbonatação pode ser determinada através de diferentes técnicas, como por exemplo, através de indicadores químicos, difracção de raio-X (XRDA), análise térmica diferencial (DTA), termogravimétrica (TGA) e a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) [4,5]. Na análise DTA é possível definir e caracterizar as substâncias que constituem o betão em função da temperatura [5]. A análise XRDA permite

apenas identificar a distribuição de cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{CaCO}_3$ , mas a análise TGA, tratando-se de um ensaio quantitativo, permite determinar o valor das suas concentrações [5]. No método de FTIR, é possível determinar a zona onde ocorre o auge de reacções entre o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{CaCO}_3$ , zona correspondente à frente de carbonatação. Também é possível através de uma análise microscópica verificar a presença de cristais  $\text{CaCO}_3$  nas diferentes zonas do betão [5]. A técnica mais prática e mais utilizada é a de medição de carbonatação com indicadores químicos de pH, por ter vantagens a nível económico e de simplicidade em relação a outras técnicas. Na medição de carbonatação o indicador provoca um contraste de coloração devido à redução de pH na frente de carbonatação, também chamado ponto de viragem de pH [5,59]. O indicador torna a área carbonatada incolor e a não afectada toma uma coloração diferente do cinzento característico do betão. Existem também outros indicadores que, ao invés de tornar uma das áreas incolor, torna as duas com coloração distinta, mas diferentes da coloração inicial [27]. É possível utilizar como indicadores químicos de pH o Vermelho de cresol, Fenolftaleína, Timolftaleína, entre outros.

O Quadro 2.2 apresenta algumas características dos indicadores químicos de pH mais utilizados [27].

**Quadro 2.2 - Características de alguns indicadores químicos de pH [27].**

| <b>Indicadores</b>   | <b>Cores</b>                    | <b>Ponto de viragem</b> | <b>Formulação</b>     |
|----------------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Vermelho de cresol   | Amarelo<br>Vermelho             | 7,2 – 8,8               | 0,1g/100 ml de etanol |
| Fenolftaleína        | Incolor<br>Rosa                 | 8,0 – 9,9               | 0,1g/100 ml de etanol |
| Timolftaleína        | Incolor<br>Azul                 | 9,3 – 10,5              | 0,1g/100 ml de etanol |
| Amarelo de alizarina | Amarelo claro<br>Amarelo escuro | 10,0 – 12,1             | 0,1g/100 ml de etanol |
| Alizarina            | Vermelho<br>Púrpura             | 10,1 – 12,1             | 0,1g/100 ml de etanol |
| Azul de Nil          | Azul<br>Vermelho                | 10,1 – 11,1             | 0,1g/100 ml de água   |

Devido à diferença do ponto de viragem entre cada indicador químico ocorrem diferentes profundidades apresentadas por cada indicador, não sendo significativas devido ao seu valor ser inferior ao erro de medida [60].

Dos indicadores químicos de pH, o mais utilizado em engenharia civil para medição da carbonatação é a fenolftaleína, que pode ser aplicada por aspersão [27]. A grande vantagem deste composto é que o seu ponto de viragem é coincidente com os valores de pH em que a carbonatação ocorre [5]. O indicador reage com a solução presente nos poros do betão e indica a coloração correspondente ao valor de pH presente em cada área. O pH normal de um betão é cerca de 13, e à medida do avanço da frente de carbonatação ocorre diminuição do valor de pH pra valores cerca de 9, e aí pode se considerar que o betão se encontra

carbonatado. Ora, é precisamente a partir desse valor que a fenolftaleína pode tomar uma coloração rosa-carmim ou incolor [5, 61,62], Quadro 2.3.

Das poucas desvantagens apresentadas pela medição através da pulverização de fenolftaleína é que em zonas onde o valor de pH é igual a 9, o indicador pode indicar uma profundidade não correspondente a um betão carbonatado ou parcialmente carbonatado [63]. Quando o indicador se torna rosa indica elevada concentração de  $\text{Ca(OH)}_2$ , mas poderá não indicar a ausência total de carbonatação, porque o método não distingue se a redução do pH foi provocada por carbonatação ou por outros gases ácidos [13].

**Quadro 2.3** - Indicador de fenolftaleína para a medição da carbonatação, adaptado [5].

| Indicador     | pH          | Coloração |
|---------------|-------------|-----------|
| Fenolftaleína | < 8,5 - 9,5 |           |
|               | < 8,5 -9, 4 |           |

Em laboratório o indicador utilizado deve ser aspergido na região recém-fracturada instantes depois, de modo a que a face fracturada não sofra grande exposição ao  $\text{CO}_2$  presente no ar. Depois da secagem do indicador, se assim se desejar, poder-se-á aplicar uma camada de resina incolor, sem brilho para uma melhor fixação da cor induzida pelo indicador [61,62]. Recomenda-se que a medição da profundidade seja executada após 24 horas da aspersão do indicador, para serem mais visíveis os limites das regiões carbonatada e não carbonatada. É necessário que a precisão seja de 0,5 mm e tornam-se sem efeito valores inferiores. No caso de na mistura dos corpos de prova terem sido utilizados agregados de grandes dimensões, a carbonatação é medida apenas nas zonas de cimento [61,62]. Como antes referido, existem outras técnicas para medir a profundidade de carbonatação.

A análise termogravimétrica, a análise química, a difracção de Raios- X, a microscopia óptica e a análise da solução de pH dos poros apresentam resultados de profundidade de carbonatação superiores e mais precisos comparando com resultados apresentados por fenolftaleína [4]. A generalidade dos autores refere resultados de profundidade de carbonatação superiores em medições feitas com técnicas distintas da executada através de indicadores químicos. Medições feitas por espectroscopia por infravermelho apresentam resultados cerca de 24 % maiores dos resultados apresentados por fenolftaleína [38]. Em cada caso de estudo deve ser avaliada qual a melhor técnica a empregar na medição. Mesmo que os indicadores químicos não consigam identificar com a máxima precisão a localização da frente de carbonatação, eles identificam a zona onde houve mudança do valor de pH, factor determinante na despassivação do aço [27]. A aplicação de indicadores químicos de pH é uma técnica que se revela muito simples, rápida e económica, podendo ser utilizada sem mão-de-obra especializada, ideal para ser utilizada em trabalho de campo e uma vantagem importante é a possibilidade de poder ser utilizada para fins comparativos de resultados [27].

Matematicamente profundidade de carbonatação pode ser determinada através de um modelo clássico, resultante da integração da Equação (2.2), Segunda lei de Fick, dando origem à nova Equação (2.8) [3,11]:

$$e_c = K_c \sqrt{t} \quad (2.8)$$

Onde:

$e_c$  = profundidade de carbonatação em mm

$K_c$  = coeficiente de carbonatação (mm/raíz ano)

$t$  = tempo de exposição ao  $\text{CO}_2$

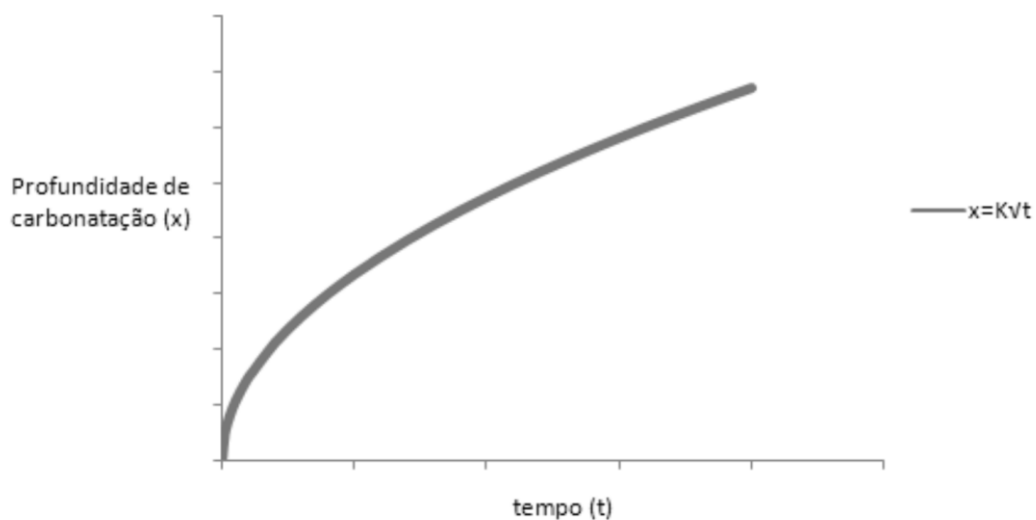


Figura 2.13 - Profundidade de carbonatação em função do tempo [5].

Ora, conhecendo a espessura do betão afectada de carbonatação através de uma das técnicas atrás descritas e também o tempo de exposição ao  $\text{CO}_2$ , é possível determinar a velocidade de carbonatação a partir do coeficiente  $K_c$  [13]. Uma das limitações desta expressão é que não tem em conta as alterações das características internas da estrutura ao longo dos anos, como por exemplo, alterações na matriz porosa do betão. Contudo, das relações de previsão da profundidade de carbonatação onde estejam envolvidas as características do betão e do ambiente, esta continua a ser das mais utilizadas [59].

## 2.7 Classificação da corrosão por carbonatação segundo a NP EN 206-1

A NP EN 206-1 [64], define as classes de exposição ambiental em função da descrição do ambiente e de alguns exemplos informativos.

O Quadro 2.4 demonstra as classes exposição por corrosão induzida no betão armado por carbonatação.

Quadro 2.4 - Classe de exposição, adaptado [64].

| Designação da classe   | Descrição do ambiente          | Exemplos informativos onde podem ocorrer as classes de exposição   |
|--|--------------------------------|--|
| <b>Corrosão induzida por carbonatação</b>  |                                |  |
| Quando o betão, armado ou contendo outros metais embebidos, se encontrar exposto ao ar e à humidade, a exposição ambiental deverá ser classificada como se segue:<br><b>NOTA:</b> As condições de humidade são as do betão de recobrimento das armaduras ou de outros metais embebidos, mas, em muitos casos, as condições deste betão podem considerar-se semelhantes às condições de humidade do ambiente circunvizinho. Nestes casos, pode ser adequada a classificação do ambiente circunvizinho. Tal pode não ser aplicável, caso exista uma barreira entre o betão e o seu ambiente. |                                |  |
| XC1  | Seco ou permanentemente húmido | Betão no interior de edifícios com baixa humidade do ar;<br>Betão permanentemente submerso em água             |
| XC2  | Húmido, raramente seco         | Superfícies de betão sujeitas a longos períodos de contacto com a água;<br>Muitas fundações.                   |
| XC3  | Moderadamente húmido           | Betão no interior de edifícios com moderada ou elevada humidade ao ar;<br>Betão no exterior protegido da chuva |
| XC4  | Cíclicamente húmido e seco     | Superfícies de betão sujeitas ao contacto com a água, fora do âmbito da classe XC2.                            |

Fazendo uma análise da classificação, é possível apurar que esta é definida por ordem crescente de agressividade.

Mais uma vez se pode verificar que a humidade e o teor de CO<sub>2</sub> presentes nos diferentes ambientes tem um papel fundamental para a distribuição das diversas classes de exposição, se bem que o segundo factor está embuçado, ou seja, os ambientes menos agressivos são aqueles onde há mais escassez do ar e por consequência de CO<sub>2</sub>.

# 3 Desenvolvimento de um dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação

## 3.1 Enquadramento

Como se pode concluir da revisão bibliográfica os ensaios acelerados pretendem reduzir o tempo necessário para conhecer o comportamento de determinado material em condições reais de exposição. Em tempo reduzido é possível verificar de que maneira a acção do ambiente influencia o período de vida útil numa estrutura em betão armado. O mesmo acontece para ensaios acelerados de carbonatação. Porém este tipo de ensaio possui algumas limitações. Já foram realizadas muitas pesquisas e ainda não foi possível normalizar este tipo de ensaio. Torna-se difícil a comparação entre resultados de diferentes autores porque cada um adoptou um diferente método de desenvolvimento do ensaio. Não há um consenso sobre a forma de relacionar os resultados obtidos em laboratório para as condições naturais de exposição, até mesmo sobre a metodologia de ensaio. Mas, para se realizar um ensaio de carbonatação acelerada é necessário um dispositivo onde possa ser possível o aprisionamento de concentrações de  $\text{CO}_2$  bastante mais elevadas do que em ambiente exterior.

Neste capítulo são apresentadas todas etapas do desenvolvimento de um protótipo capaz de executar o ensaio acelerado de carbonatação. Este dispositivo criado permite fazer ensaios com diferentes teores de  $\text{CO}_2$  e diferentes teores de humidade relativa simultaneamente. No início do capítulo há uma apresentação do esquema geral das componentes do dispositivo, posteriormente os materiais utilizados, funcionamento e montagem.

Houve também uma fase de menor importância, dita pré-desenvolvimento do dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação. Nesta fase foram postas de parte as soluções não viáveis para a solução final. Por exemplo, a de um dispositivo com várias câmaras de carbonatação, contendo diferentes ambientes atmosféricos, mas com alimentação de  $\text{CO}_2$  em série. Seria possível ao mesmo tempo executar várias combinações de ensaio de carbonatação acelerada. Tornou-se inviável devido à possível contaminação dos diferentes ambientes, visto estarem diferentes teores de humidade relativa interligados. Tomou-se como opção então a solução possuir apenas um recipiente onde seja feita uma combinação de humidade relativa e teor de  $\text{CO}_2$  em cada ensaio.

## 3.2 Dispositivo inicial

Naturalmente, a solução adoptada teve em conta a revisão bibliográfica. O dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação consiste na acoplagem de vários elementos e cada um deles tem uma aplicação na realização do ensaio.

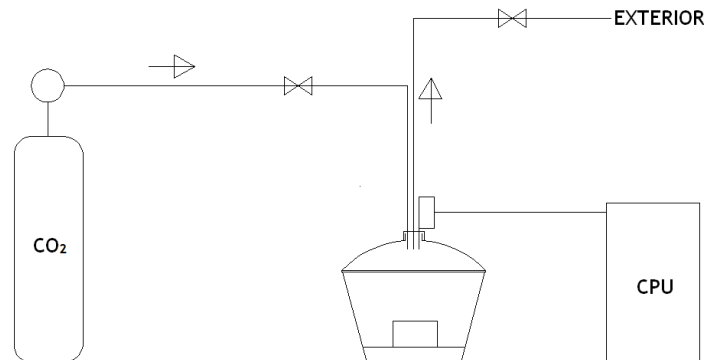
Um dos mais importantes elementos constituintes do dispositivo é um exsiccador (com uma capacidade de  $0,01\text{m}^3$ ), devidamente adaptado para realizar a função específica de câmara de carbonatação. Neste elemento é onde são introduzidos os corpos de prova e são criadas as condições ambientais necessárias para o ensaio, ou seja, é onde decorre o ensaio. A tampa do exsiccador é adaptada de modo a que seja possível a introdução de  $\text{CO}_2$  para o interior sem que posteriormente haja perdas gás por fuga. O fluxo do gás para o interior do exsiccador provém de um cilindro de  $\text{CO}_2$  comprimido, ajustado através de um manómetro. A pressão do ar no interior do exsiccador é igual à pressão atmosférica, fruto de uma ligação do dispositivo para o exterior. Quando se executa um ciclo de fornecimento de  $\text{CO}_2$  é aberta essa ligação para o exterior e a pressão atmosférica no interior do dispositivo não se altera. Neste dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação, o controlo da concentração de gás no interior do exsiccador é feito com um sensor ligado a um computador. O sensor capta o teor de  $\text{CO}_2$  no interior do exsiccador e envia os respectivos dados para um *software* especializado onde é possível visualizar a cada instante o teor de  $\text{CO}_2$  do ensaio.

A humidade relativa é criada com o auxílio de sais, cada tipo de sal utilizado confere um diferente teor de humidade relativa no interior da câmara de carbonatação. O teor de humidade e temperatura é controlado com a ajuda de um *datalogger*, (higrómetro).

Cada elemento do dispositivo tem uma função específica importante para que o dispositivo seja capaz de realizar o ensaio acelerado de carbonatação de uma forma competente. É necessário referir que o orifício da tampa do exsiccador é o único local onde ocorrem as transferências gasosas, assim, possui uma rolha de silicone. Esta isola de forma eficiente o ambiente interior do ambiente exterior sem que ocorram fugas de gás nem transferências de humidade indesejadas. Tem-se, assim, a convicção que nenhum dos ambientes, interior e exterior da câmara, é afectado pelo outro. A rolha, bem como os restantes elementos, tem neste dispositivo uma função extremamente importante: é o local onde se encontra instalado o sensor de  $\text{CO}_2$  e por onde é introduzido o higrómetro.

O resultado das somas das partes é um protótipo especialmente desenvolvido para realizar ensaios onde são reunidos teores de  $\text{CO}_2$  bastante mais elevados do que num ambiente real, com diferentes teores de humidade relativa, as duas condições ambientais essenciais para a realização de um ensaio acelerado de carbonatação em laboratório.

Na Figura 3.1 é possível visualizar um esquema representativo do dispositivo inicialmente desenvolvido neste trabalho.



**Figura 3.1** - Esquema representativo do dispositivo inicial de ensaio acelerado de carbonatação.

A partir da Figura 3.1 pode-se constatar o que foi dito anteriormente acerca do dispositivo inicial. Na tampa do exsicador o dispositivo exerce ligação a uma botija industrial de CO<sub>2</sub> e outra ligação para o exterior do laboratório. Em cada uma das ligações encontra-se uma válvula, ilustradas na Figura 3.1, onde são barradas as trocas gasosas entre ambientes sempre que necessário. Outro aspecto também já referido anteriormente e que se pode verificar é o da colocação do sensor na rolha colocada na tampa do exsicador. O sensor está conectado ao computador para serem devidamente controlados e registados os teores gasosos no decorrer do ensaio.

### 3.2.1 Lista de peças

Neste ponto são apresentados todos os elementos utilizados no desenvolvimento do dispositivo.

De entre materiais e aparelhos foi necessário:

- Exsicador
- Uma botija industrial de CO<sub>2</sub> comprimido
- Sensor CO<sub>2</sub>
- Computador
- *Software* especializado
- Tubos em plástico (4 mm)
- Pinças
- Sais
- Grelha metálica

- Rolha de silicone
- Ventoinha 12V
- Alimentador eléctrico
- *Datalogger*

### 3.2.2 Funcionamento

#### 3.2.2.1 Fornecimento de CO<sub>2</sub>

Como dito anteriormente, o abastecimento do dispositivo é realizado por um cilindro de CO<sub>2</sub> comprimido. O fluxo de gás sai do cilindro e entra em contacto com o ar dentro do exsicador, de forma a obter as concentrações pretendidas para o ensaio a desenvolver. Neste dispositivo de ensaio utiliza-se um circuito aberto aquando do fornecimento de CO<sub>2</sub>, tornando-se posteriormente num circuito fechado, ou seja, logo que termine o intervalo de fornecimento do gás para o exsicador, o circuito fecha-se, deixando de haver trocas de gás com o exterior. Durante o período de fornecimento de CO<sub>2</sub> é aberta em simultâneo a ligação de entrada e de CO<sub>2</sub> e também uma ligação para o exterior. Desta forma, é possível manter dentro do exsicador um valor de pressão semelhante ao da pressão atmosférica no laboratório.

O fluxo de entrada de CO<sub>2</sub> é ajustado com um manómetro, manualmente, sendo necessário um rigoroso controlo do operador para que não se verifiquem concentrações de indesejadas CO<sub>2</sub> no ensaio de carbonatação acelerada. A metodologia de fornecimento de CO<sub>2</sub>, obtenção de diferentes concentrações, é explicada mais à frente no ponto 3.3.

#### 3.2.2.2 Criação condições de humidade relativa

No dispositivo de ensaio a humidade relativa é conseguida com recurso a sais. Um meio também adoptado quando é necessário calibrar equipamentos higrómetros. Cada tipo de sal em solução aquosa sobressaturada produz uma humidade relativa específica. Quadro 3.1 demonstra uma lista de sais habitualmente utilizados e as suas respectivas humidades relativas produzidas [65]. No caso concreto do dispositivo desenvolvido, os sais são colocados de forma distribuída na base da câmara de carbonatação. São bastante eficientes e de acção rápida. Nos testes de funcionamento do dispositivo o teor de humidade relativa registada pelo datalogger foi muito aproximado do valor fornecido pelo fabricante. Estas soluções salinas saturadas absorvem ou libertam grande quantidade de água sem alterar o equilíbrio de pressão do vapor no interior da camara [66]. Por uma questão de rigor durante os ensaios devem ser realizadas inspecções periódicas para verificar se o valor da humidade relativa se encontra dentro do intervalo pretendido.

Quadro 3.1 - Humidade relativa produzida em cada tipo de solução aquosa sobressaturada [65].

| Solução Aquosa Sobressaturada |  | 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              | $\text{NaNO}_2$  | 65                                       |
| Nitrato de Amónio             | $\text{NH}_4\text{NO}_3$                               | 63                                       |
| Nitrato de Cálcio             | $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \times 4 \text{H}_2\text{O}$ | 55                                       |
| Carbonato de Potássio         | $\text{K}_2\text{CO}_3$                                | 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                                       |

### 3.2.2.3 Sensor de CO<sub>2</sub>

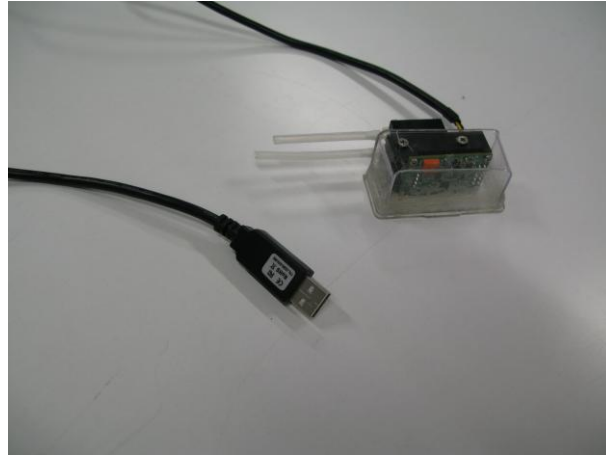
O sensor de CO<sub>2</sub> incorporado no dispositivo de ensaio de carbonatação acelerada construído é um COZIR WIDE RANGE 100 CO<sub>2</sub> SENSOR<sup>®</sup>, desenvolvido pela empresa CO<sub>2</sub> meter<sup>®</sup>. Figura 3.2. Por motivos de segurança do equipamento colocou-se uma protecção em acrílico para o sensor adquirir robustez. No que concerne a este trabalho o sensor tem um funcionamento relativamente simples. O sensor tem dois tubos, um para entrada e outro para saída do CO<sub>2</sub>.

Depois de se colocar o sensor no ambiente que se pretende, o gás introduz-se no aparelho através do tubo de entrada até uma célula no interior do aparelho, a qual regista a concentração nesse instante e envia a informação para o computador. Depois da leitura realizada o CO<sub>2</sub> volta para o ambiente pelo tubo de saída. E este processo é repetido a cada instante. Portanto, sempre que o sensor esteja a trabalhar ele está a operar desta forma.

Podem-se destacar algumas características deste modelo de sensor de CO<sub>2</sub>.

- Pequeno e de fácil manuseamento.
- Está capacitado para recolher valores de concentração dentro de qualquer ambiente, onde o intervalo de valores varia desde 0 a 100 %.
- Compatível com diversos programas de tratamento de dados.

- Conexão ao computador através de USB
- É um sensor com auto calibração.
- Responde instantaneamente a mudanças nos níveis de dióxido de carbono por possuir uma excelente resposta.
- Muito preciso



**Figura 3.2** - Sensor de CO<sub>2</sub> utilizado no desenvolvimento do dispositivo de ensaio acelerado de carbonatação.

#### **3.2.2.4 Software**

Todos os dados recolhidos pelo sensor são analisados por programas especializados. No caso concreto, todos os dados recolhidos são posteriormente tratado com o auxílio do DAS 100<sup>®</sup>, Figura 4.3 e o GasLab<sup>®</sup>, Figura 4.4. Estes programas são recomendados pelo fabricante do sensor. Com estes programas é possível registar bastantes dados captados pelo sensor. O máximo e mínimo de teor de CO<sub>2</sub> durante o ensaio, o teor instantâneo, entre outros.

É também possível gravar os dados recolhidos de um qualquer ensaio para analisar. O traçado desenhado da concentração a cada instante tem, no eixo das abcissas, o tempo decorrido, e no eixo das ordenadas, o teor do CO<sub>2</sub>. As unidades do eixo das ordenadas podem ser em percentagem (%) ou partes por milhão (ppm).

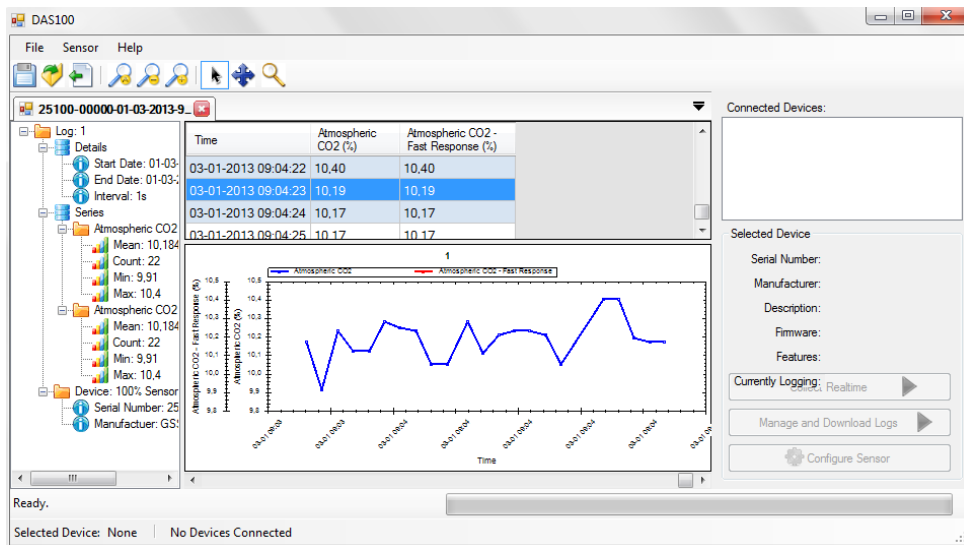


Figura 3.3 - Software DAS 100® de tratamento de dados registados pelo sensor de CO<sub>2</sub>.

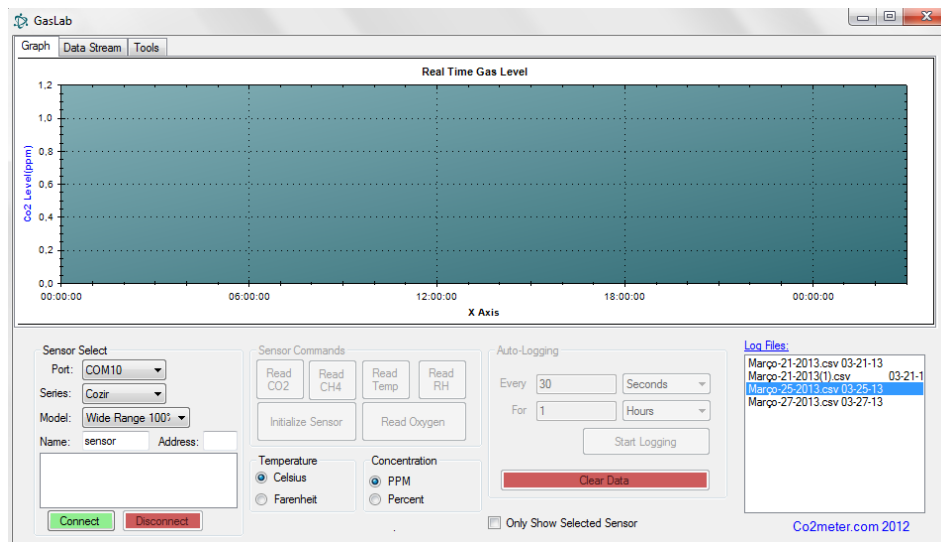


Figura 3.4 - Software GasLab® de tratamento de dados registados pelo sensor de CO<sub>2</sub>.

### 3.2.3 Assemblagem do dispositivo

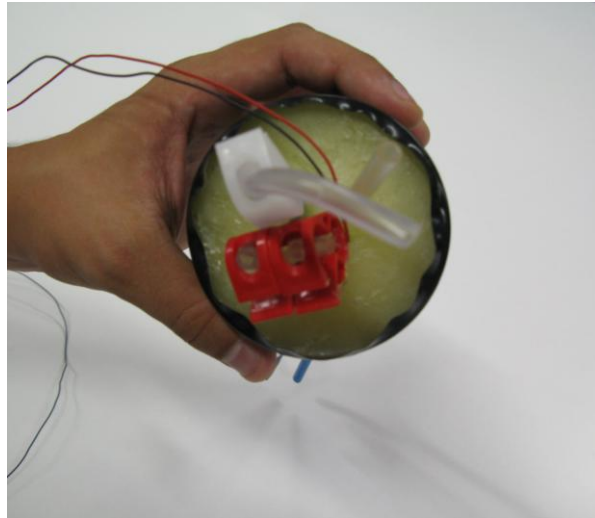
A assemblagem do dispositivo faz-se do seguinte modo:

- 1) Instalam-se 4 tubos maleáveis de pequeno tamanho e pequeno diâmetro na rolha de silicone e em seguida colocam-se pinças de segurança em cada um dos tubos, Figura 3.5.
- 2) Coloca-se na tampa do exsicador a rolha de silicone, bem como todas as ligações necessárias, juntamente com material vedante, impossibilitando qualquer fuga de gás.

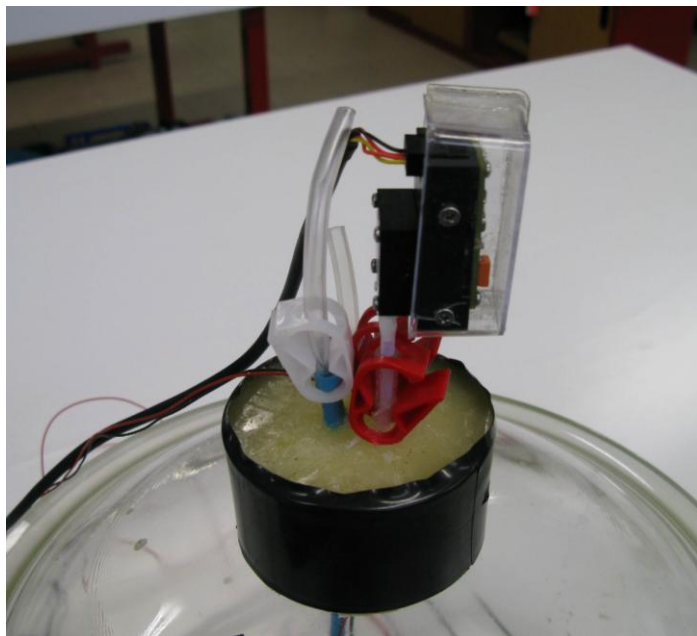
- 3) Instala-se o sensor de CO<sub>2</sub> em dois dos tubos presentes na rolha Figura 3.6, e conecta-se ao computador através de uma ligação USB.

Com os restantes tubos faz-se uma ligação para o cilindro e outra para o exterior do laboratório, Figura 3.7.

Os tubos presentes na rolha de silicone podem ser denominados por válvulas, pois permitem ou impedem que haja troca de gases com o exterior.



**Figura 3.5** - Colocação da rolha de silicone e componentes na tampa do exsiccador.



**Figura 3.6** - Colocação do sensor e tubos na rolha de silicone.

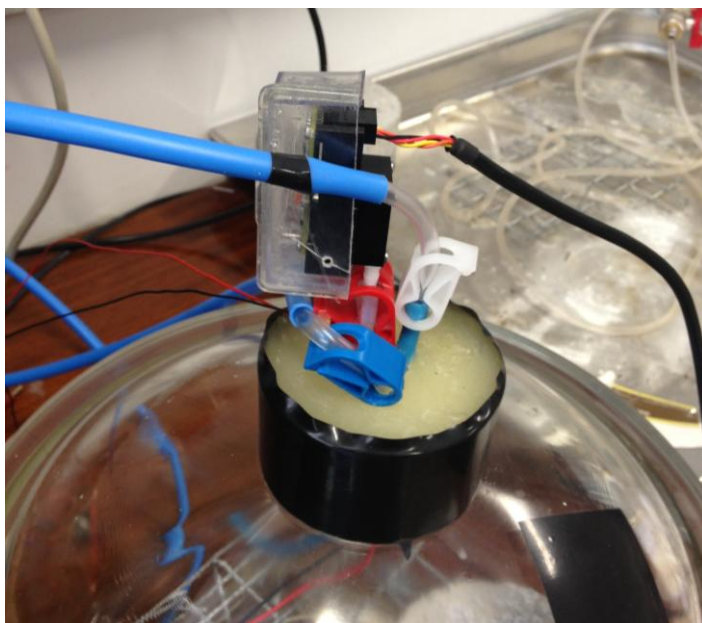


Figura 3.7 - Ligação para o cilindro de CO<sub>2</sub> e para o exterior

### 3.3 Testes de funcionamento do dispositivo inicial

Estando todo o dispositivo pronto para o seu funcionamento, deu-se lugar a uma fase de testes prévios com a finalidade de provar a sua eficiência para os ensaios de carbonatação acelerada. A fase de testes de funcionamento foi executada por 3 etapas.

- 1) Controlo da concentração de CO<sub>2</sub>
- 2) Controlo da concentração de CO<sub>2</sub> e HR
- 3) Controlo da concentração de CO<sub>2</sub>, HR e corpo de prova

Numa primeira fase o objectivo foi controlar a concentração de CO<sub>2</sub> no interior da câmara de carbonatação, para isso utilizaram-se os devidos aparelhos de monitorização.

Nesta fase inicial dos testes de funcionamento do ensaio foi verificado que a concentração do CO<sub>2</sub> registada pelo sensor não permanecia constante. Ao longo do tempo havia um decréscimo do teor de cerca de 10 %/hora em todos os testes realizados. Situação inicialmente confusa porque o sistema montado até então não denunciava a possibilidade de ocorrência de fugas de gás para o exterior. Simultaneamente, constatou-se que colocando o sensor na base da câmara de carbonatação era registada maior concentração de CO<sub>2</sub> do que a concentração registada no topo da câmara. Este fenómeno deve-se ao facto de o CO<sub>2</sub> possuir uma densidade massa molar superior e aos restantes constituintes presentes no ar. Num meio onde não há movimento do ar, o CO<sub>2</sub> tem tendência de assentamento na base.

No sentido de contrariar este efeito, foi introduzido um sistema de ventilação, constituído por uma ventoinha de 12 Volts na câmara de carbonatação, para que o ar pudesse circular uniformemente em todo o interior.

Posteriormente à instalação deste sistema de ventilação foi possível registar valores de concentração de CO<sub>2</sub> muito próximos em todos os pontos internos da câmara, não havendo assim variação de concentração significativa da base para o topo da câmara de carbonatação, como se tinha verificado anteriormente.

### 3.3.1 Sem sistema de ventilação

A Figura 3.8, ilustra o progresso da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo registado pelo equipamento sensor, colocado no topo da câmara de carbonatação sem sistema de ventilação.

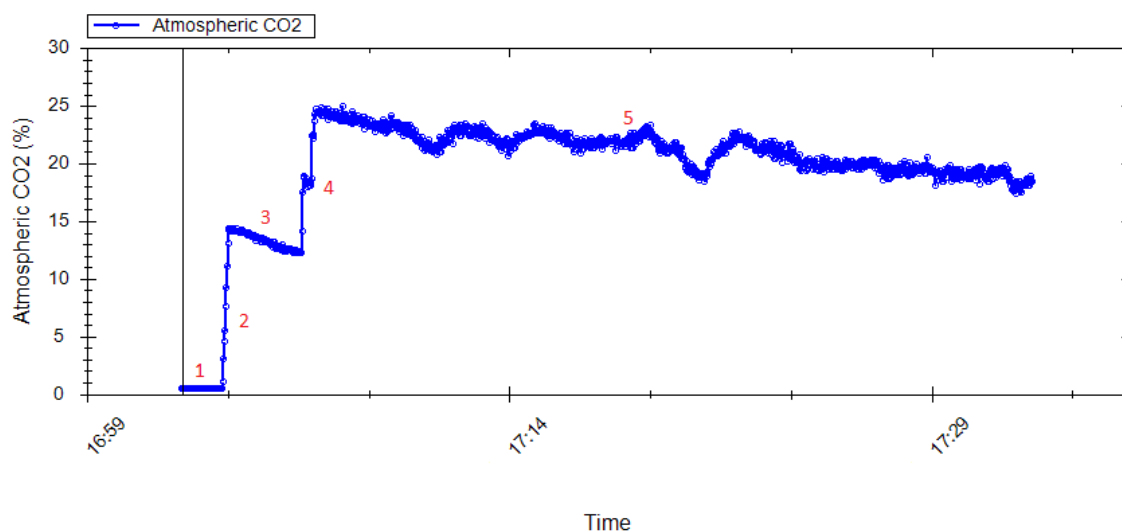


Figura 3.8 - Variação ao longo do tempo do teor de CO<sub>2</sub> num dispositivo sem sistema de ventilação.

O Desenvolvimento da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo pode ser definido pela numeração presente na figura como:

- 1) Concentração de CO<sub>2</sub> inicial, (Valor semelhante ao presente no ambiente exterior).
- 2) Aumento brusco da concentração provocado pelo fornecimento de gás para o interior.
- 3) Decréscimo devido ao natural assentamento de CO<sub>2</sub> na base da câmara.
- 4) Aumento brusco da concentração provocado por novo fornecimento de gás para o interior.
- 5) Decréscimo devido ao natural assentamento de CO<sub>2</sub> na base da câmara.

### 3.3.2 Com sistema de ventilação

A Figura 3.9 demonstra o progresso da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo registado pelo equipamento leitura colocado no topo da câmara de carbonatação com sistema de ventilação.

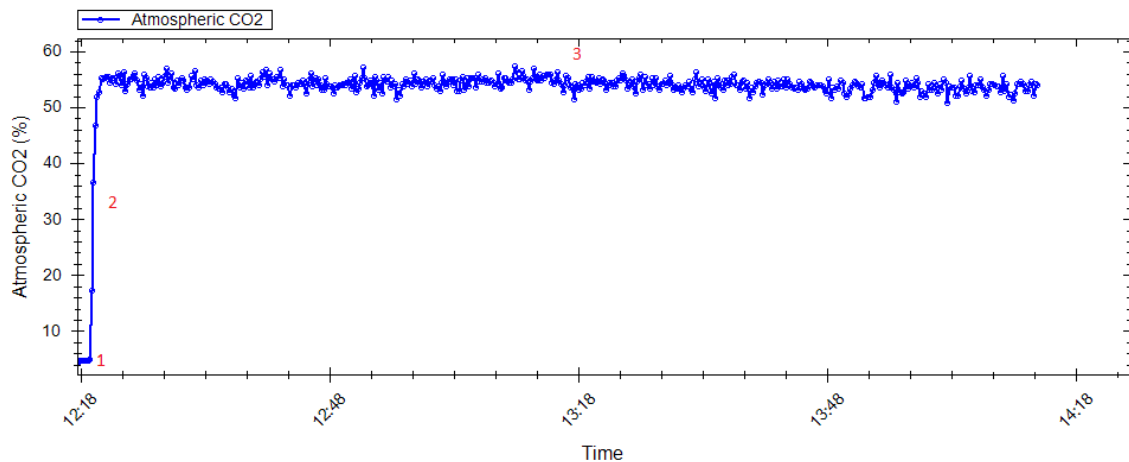


Figura 3.9 - Variação ao longo do tempo do teor de CO<sub>2</sub> num dispositivo com sistema de ventilação.

O desenvolvimento da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo pode ser definido pela numeração presente na figura como:

- 1) Concentração de CO<sub>2</sub> inicial, (Valor semelhante ao presente no ambiente exterior).
- 2) Aumento brusco da concentração provocado pelo fornecimento de gás para o interior.
- 3) Permanência da concentração dentro de um intervalo aceitável, (ou ausência de decréscimo da concentração).

### 3.3.3 Controlo da concentração de CO<sub>2</sub>

Como dito anteriormente, a injeção de CO<sub>2</sub> para o interior da câmara de carbonatação é feita manualmente, através de uma toneira com um manómetro regulador de fluxo instalado, Figura 4.10. Para controlar o teor de CO<sub>2</sub> dentro da câmara de carbonatação foi necessário criar uma metodologia, devido à multiplicidade de concentrações que podem ser utilizadas em ensaios de carbonatação. Assim, o teor de CO<sub>2</sub> foi controlado a partir do tempo de abertura da torneira do cilindro de CO<sub>2</sub> para um fluxo de saída de 5l/minuto medido através do manómetro regulador de fluxo. A um determinado intervalo de tempo de abertura da torneira corresponde uma concentração média de CO<sub>2</sub>. Realizou-se leitura da concentração do gás para vários intervalos de tempo, separados cada um por 10 segundos até ser obtida a concentração máxima possível, os 100 %.

Exemplo da metodologia empregada nesta fase do desenvolvimento do dispositivo são as Figuras 4.11 e Figura 4.12 que apresentam os valores de concentrações de CO<sub>2</sub> obtidos através da abertura da torneira para 10 segundos e 20 segundos, respectivamente.



Figura 3.10 - Manómetro regulador do fluxo de CO<sub>2</sub>

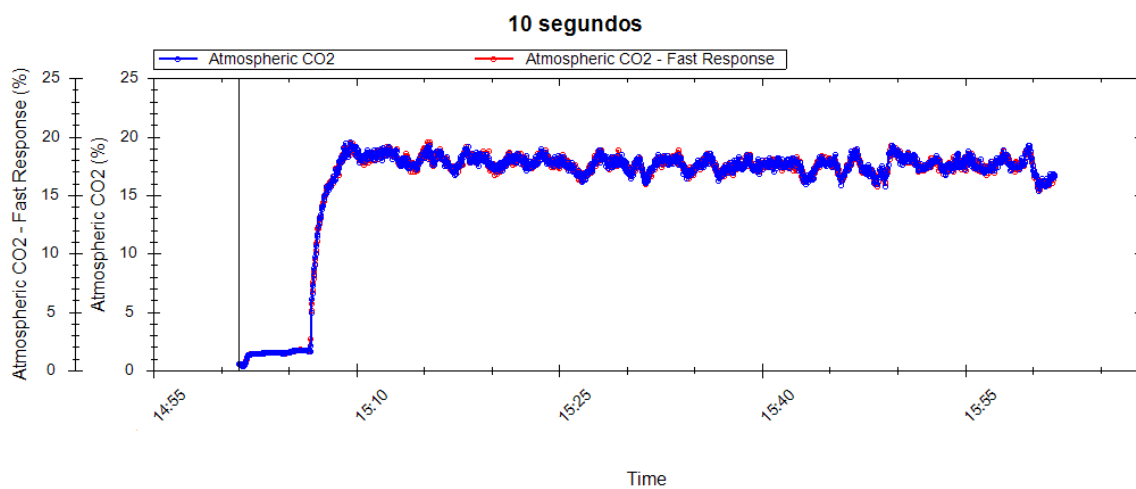


Figura 3.11 - Teor de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo obtido para um intervalo de 10 segundos de fornecimento.

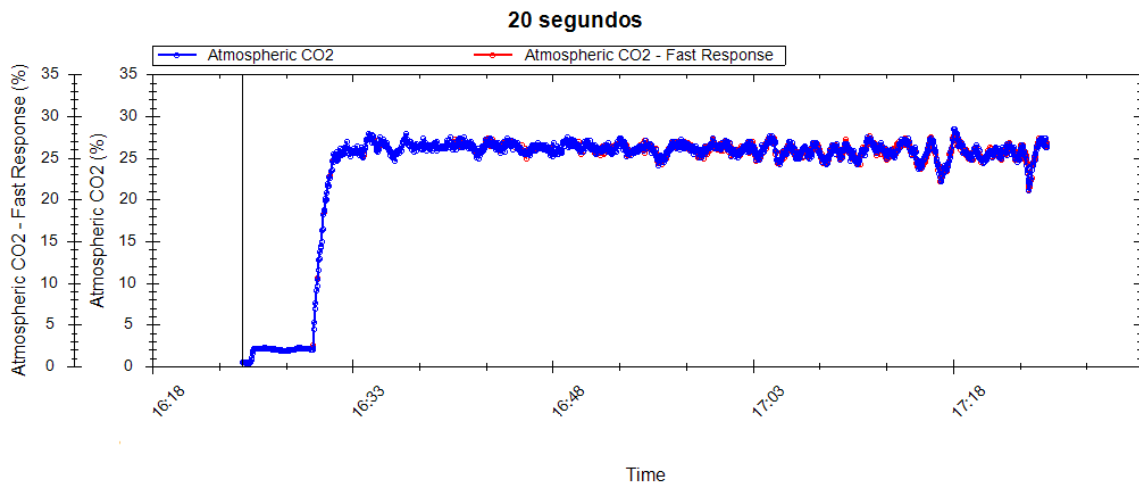


Figura 3.12 - Teor de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo obtido para um intervalo de 20 segundos de fornecimento.

Posteriormente à realização das respectivas leituras referidas no ponto anterior, foi possível elaborar a seguinte recta, onde é relacionado o tempo de injeção de CO<sub>2</sub> para o interior da câmara, com o respectivo valor de concentração do gás obtido. Assim, para o volume da câmara de carbonatação concebida no presente estudo, qualquer valor de concentração pretendido pode ser determinado a partir da recta da Figura 3.13. É possível observar que decorrido um minuto de fornecimento de CO<sub>2</sub>, o valor de concentração registado é aproximadamente 50 %. Recordando o volume do exsicador (0,01 m<sup>3</sup>) e o fluxo de entrada de CO<sub>2</sub>, constata-se que a relação é aproximadamente linear.

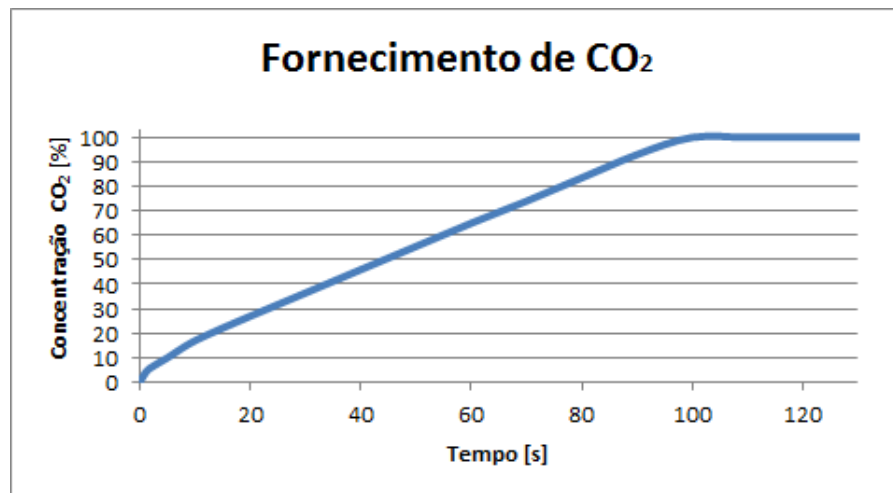


Figura 3.13 - Relação do intervalo de fornecimento de CO<sub>2</sub> e teor obtido.

### 3.3.3.1 Controlo da concentração de CO<sub>2</sub> e HR

A segunda etapa foi então regular o ambiente com uma concentração de CO<sub>2</sub> constante, variando somente o teor de HR. Não se registou nenhuma variação dos valores em nenhuma das variáveis em questão, o teor de CO<sub>2</sub> e a HR de cada ambiente testado nos ensaios preliminares.

### 3.3.3.2 Controlo da concentração de CO<sub>2</sub>, HR e corpo de prova

Na etapa final de testes foram reunidas as evoluções do estudo retidas nas etapas anteriores, ao que se acrescentou um dos corpos de prova. Submeteu-se um provete cilíndrico de betão de 10 cm de raio e 15 cm de altura a variações de concentração de CO<sub>2</sub> e variações de teores de HR. Nos ensaios realizados nesta fase do estudo, verificou-se que em todos eles o corpo de prova teve um efeito absorvente de CO<sub>2</sub> no seu interior, provocando ligeiros decréscimos lineares de concentração ao longo do tempo. Uma redução aproximadamente de 2 %/hora. A partir da metodologia criada no ponto (controlo da concentração de CO<sub>2</sub>), a taxa média de decréscimo foi anulada. Então, foi possível que a concentração ao longo do tempo assumisse valores sem grandes variações.

### 3.3.4 Funcionamento do dispositivo

O funcionamento do sistema de ensaio acelerado de carbonatação guia-se pelas seguintes etapas:

- 1) Introdução de soluções salinas na base da câmara de carbonatação, de modo a conferir a humidade relativa pretendida no interior, aguardando que o ambiente entre em equilíbrio com o auxílio do *datalogger*.
- 2) Introdução do corpo de prova na câmara de carbonatação.
- 3) Abertura da válvula de entrada de CO<sub>2</sub> e da válvula de purga do ar.
- 4) Abertura da torneira do cilindro de CO<sub>2</sub> comprimido e contagem do tempo necessário até ao fecho.
- 5) Fecho da válvula de entrada de CO<sub>2</sub> e da válvula de purga do ar.
- 6) Verificação através do *software* especializado do teor de CO<sub>2</sub> presente no exsiccador.
- 7) Caso não verifique o ponto 6 repetir todos os passos.
- 8) Realizar inspecções periódicas do teor de CO<sub>2</sub> e repor o gás sempre que necessário.
- 9) Realizar inspecções periódicas do teor de HR.

### 3.4 Dispositivo Final

O dispositivo final tem o acréscimo do sistema de ventilação em relação ao dispositivo inicial apresentado. Esta adição é devida às conclusões obtidas nos testes de funcionamento do aparelho. Com a instalação de uma ventoinha com alimentação eléctrica é possível fazer uma completa circulação do ar dentro do exsiccador no decorrer do ensaio. Há homogeneização do teor de  $\text{CO}_2$  no interior do dispositivo e durante o ensaio e o corpo de prova absorve o gás pelas faces expostas uniformemente.

Na Figura 3.14 é ilustrado um esquema representativo do dispositivo de ensaio numa versão final. Em relação ao dispositivo inicial apresentado anteriormente na Figura 3.1 é bem visível que foi instalado um sistema de ventilação e a ventoinha se encontra dentro do exsiccador com a função de fazer circulação do ar.

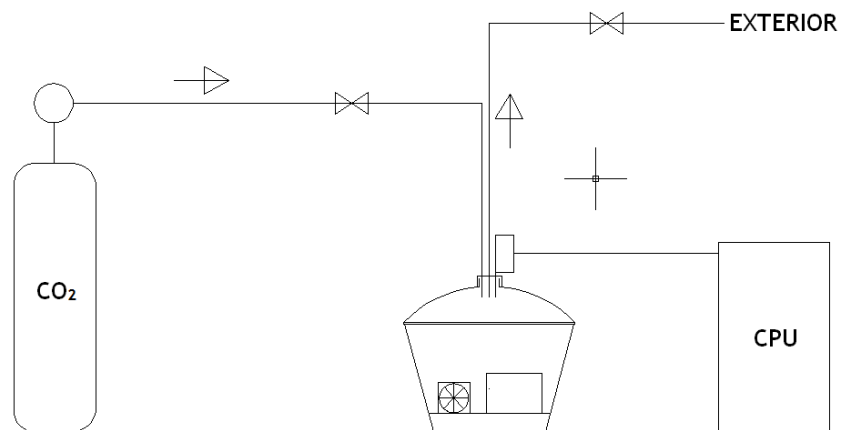


Figura 3.14 - Esquema representativo do dispositivo final de ensaio acelerado de carbonatação.

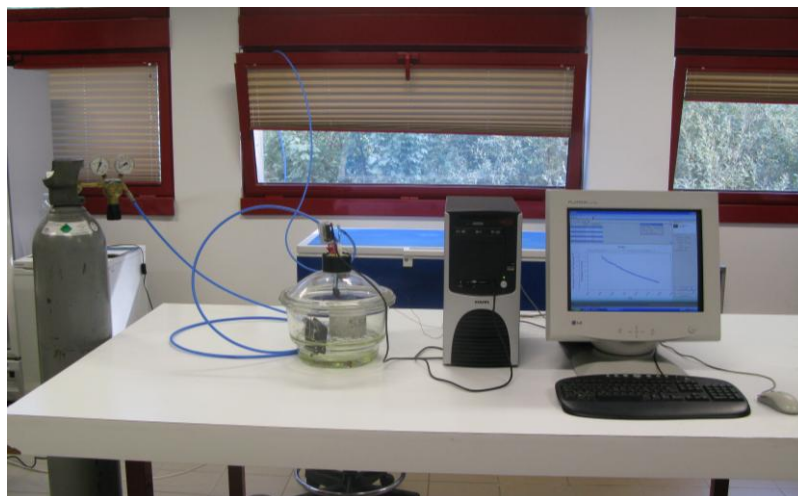


Figura 3.15 - Dispositivo final de ensaio acelerado de carbonatação no interior do laboratório.



# 4 Caracterização do betão para o ensaio acelerado de carbonatação

## 4.1 Enquadramento

No ensaio acelerado de carbonatação dois dos parâmetros fundamentais são relacionados com a capacidade de transporte de água e de ar na estrutura porosa do betão. Assim foram realizados os seguintes ensaios, permeabilidade à água, permeabilidade ao oxigénio, profundidade de penetração de água por absorção capilar, microporosímetro de mercúrio, análise Termo gravimétrica. Para caracterizar os parâmetros mecânicos, realizou-se o ensaio de verificação de resistência à compressão, aos 28 dias.

Estes ensaios de caracterização das propriedades intrínsecas do betão foram realizados de acordo com procedimentos de ensaio normalizados ou estabelecidos em estudos efectuados anteriormente.

Neste capítulo é apresentada uma descrição de todos os procedimentos experimentais executados e os respectivos resultados, sob forma de quadros ou gráficos. Faz-se também um relacionamento entre os resultados obtidos neste trabalho com resultados obtidos em outros estudos com ensaios semelhantes.

## 4.2 Especificações do Betão

O betão utilizado nos ensaios deste estudo é um betão produzido em central, aplicado no âmbito do projecto SELICON e tem as seguintes especificações [62]:

- 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 - Tipo II A/L.

Depois da amassadura este betão foi colocado em período de cura. O tipo de cura utilizado foi o tipo STANDARD [67].

### 4.3 Execução dos corpos de prova

Após 28 dias de cura, prepararam-se corpos de prova em betão necessários para realizar os ensaios planeados para a sua caracterização. Os ensaios realizados neste capítulo visam executar uma devida caracterização da mistura de betão utilizada e os ensaios de carbonatação realizados no dispositivo construído, apresentado no capítulo 3.

De uma placa de betão com dimensões de 50 x 50 x 15 [cm] de foram retirados os provetes cilíndricos através de uma máquina de corte, caroteadora, Figura 5.1. Os provetes foram cortados e preparados de acordo com as dimensões exigidas pelas normas e especificações de cada ensaio de durabilidade, Quadro 5.1.

Os provetes cilíndricos foram denominados em duas diferentes tipologias, conforme as dimensões, Figura 5.1:

- Tipo 1 - 40 \* 80 [mm].
- Tipo 2 - 100 \* 150 [mm].

O corte executou-se na direcção perpendicular à face do enchimento da placa de betão.

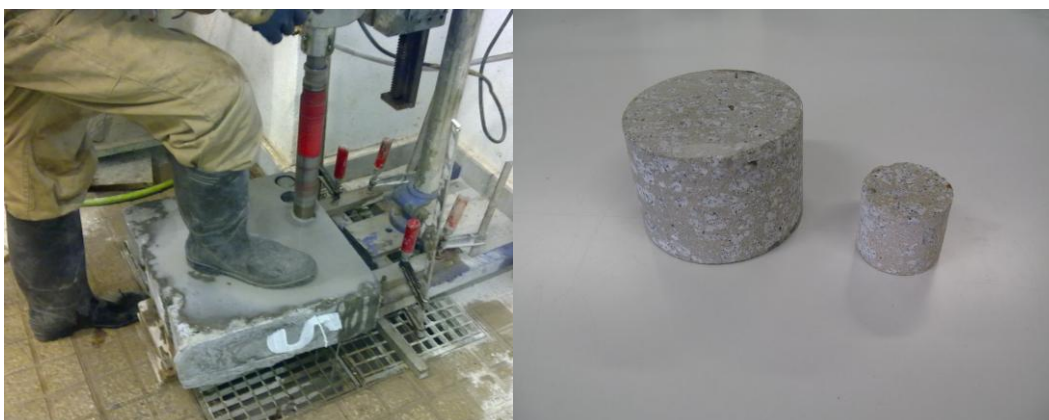


Figura 4.1 - Carotagem e dois tipos de corpos de prova utilizados

Quadro 4.1 - Tipos de corpos de prova utilizados nos ensaios

| Corpo de prova |                | Tipo | Ensaio                       |
|----------------|----------------|------|------------------------------|
| Forma          | Dimensões [mm] |      |                              |
| Cilindro       | 40*80          | 1    | Microporosímetro de mercurio |
| Cilindro       | 40*80          | 1    | TGA                          |
| Cilindro       | 40*80          | 1    | Permeabilidade ao Oxigénio   |
| Cilindro       | 40*80          | 1    | Permeabilidade à Água        |
| Cilindro       | 100*150        | 2    | Carbonatação                 |
| Cilindro       | 100*150        | 2    | Absorção Capilar             |
| Cubo           | 150            | -    | Resistencia à Compressão     |

Para o ensaio de porosimetria com microporosímetro de mercúrio e ensaio TGA utilizaram-se corpos de prova derivados do esmagamento de um corpo de prova do Tipo 1.

#### **4.4 Pré-Condicionamento dos corpos de prova**

Sabe-se que a humidade interna do betão depois da betonagem fica dependente do ambiente em que a cura é realizada. Durante o período de cura ocorrem trocas de humidade com o ambiente de uma forma mais ou menos rápida e de uma forma irregular. No entanto, para a determinação de um qualquer parâmetro de caracterização do betão pretende-se que o ensaio seja realizado utilizando todos os corpos de prova em condições de equilíbrio.

Após o tempo de cura, 28 dias, todos os corpos de prova cilíndricos destinados aos ensaios de caracterização do betão, foram colocados em processo de pré-condicionamento. O pré-condicionamento permite aos corpos de prova uma preparação necessária para ensaios posteriores, uniformizando a distribuição da humidade na matriz porosa do betão, diminuindo da variabilidade dos resultados a obter, conseguindo assim uma melhor coerência.

O procedimento de pré-condicionamento adoptado neste trabalho consiste num processo simplificado e baseado no procedimento do método de RILEM TC 116\_PCD [67]. Este processo permite aos provetes recuperarem o teor de humidade perdida na secagem de um modo a que haja uma redistribuição uniforme da humidade no interior do betão. Este novo procedimento simplificado foi desenvolvido de tal forma que permite reduzir a duração do pré-condicionamento em relação ao RILEM TC 116-PCD [67], conseguindo resultados semelhantes [68]. Consiste em colocar os provetes numa estufa a 50 °C durante 24 horas para secagem. Em seguida, os provetes são retirados da estufa e faz-se uma medição da massa de cada um.

A fase seguinte do processo de pré-condicionamento consiste em colocar os corpos de prova dentro de uma câmara com um ambiente de 75 % de humidade relativa e uma temperatura de aproximadamente  $20 \pm 2$  °C. Assim, com esta metodologia, os corpos de prova recuperam a humidade perdida durante o processo de pré-secagem de um modo uniforme até um equilíbrio de 75 % de humidade relativa. Para que tal ocorra de uma forma eficiente, o período de pré-condicionamento deverá ser de, pelo menos, 2 semanas [68].

## 4.5 Condições de realização e descrição dos ensaios

### 4.5.1 Ensaios de caracterização do betão

#### 4.5.1.1 Ensaio de verificação de resistência à compressão

A resistência à compressão é uma das características mecânicas mais importantes que influenciam a durabilidades das estruturas em betão.

Com este ensaio pretende-se determinar a tensão de rotura [Mpa] e a carga máxima [KN] de corpos de prova cúbicos, com dimensões 150 mm de aresta, aos 28 dias de cura [69]. Neste ensaio foi utilizada uma prensa que aplica um carregamento com uma taxa de acréscimo de 0,3KN/s e regista o valor da tensão de rotura dos corpos de prova [70]. De entre todos os ensaios efectuados neste trabalho, o ensaio de verificação de resistência à compressão foi o único que não foi submetido ao período de pré-condicionamento. Assim, e como já referido os valores de tensão de rotura [Mpa] e carga máxima [KN] são referentes a uma idade do betão de 28 dias.



Figura 4.2 - Ensaio de verificação da resistência a compressão.

#### 4.5.1.2 Ensaio de absorção capilar

Na realização deste ensaio foram seguidos os procedimentos apresentados na norma do LNEC E 393-1993- Betões para o Ensaio de determinação da Absorção de água por capilaridade [71], da Norma Francesa NF B 10-502 [72], para determinação dos coeficientes de capilaridade e da Norma Alemã DIN 52617 [73], para determinação dos coeficientes de absorção. Utilizaram-se corpos de prova do Tipo 2 neste ensaio. A partir deste ensaio é possível estimar a maior o menor capacidade que um betão possui para absorver a água por capilaridade, parâmetro

este muito importante na durabilidade de materiais e do próprio betão. Na fase inicial do ensaio foram retirados os corpos de prova do ambiente de 75 % de HR, que se encontravam no vigésimo primeiro diáde pré-condicionamento, foi medida a massa de cada um e foram colocados em um tabuleiro com água até o nível atingir cerca de  $5 \pm 1$  mm acima da face inferior do corpo de prova, Figura 4.3. No decorrer do ensaio foram mantidas as mesmas condições de HR existentes na camara de pré-condicionamento. Foi feita medição nos corpos de prova às 3, 6, 24, 72 horas após se ter dado início ao ensaio, note-se quem cada medição se teve o cuidado de se limpar a superfície em contacto com a água com um pano húmido e também de manter a altura da água a  $5 \pm 1$  mm acima da base do provete [71].



Figura 4.3 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.

O coeficiente de absorção, segundo a Normal DIN 52617 [73],  $A_w$ , é calculado pela equação (4.1):

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

$m_{24h}$  - 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  $m^2$

O coeficiente de capilaridade, segundo a NF B 10-502 [72], C, expressado em  $[g.cm^{-2}.min^{-0,5}]$ , é calculado pela equação (4.2):

$$C = \frac{100 \times m_{24h}}{A \times \sqrt{24} \times 60} \quad (4.2)$$

$m_{24h}$  - 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  $cm^2$ .

#### 4.5.1.3 Determinação de permeabilidade ao oxigénio

O ensaio de determinação de permeabilidade ao oxigénio realizou-se através de um permeâmetro presente nos Laboratórios de Durabilidade de Materiais da Universidade da Beira Interior Figura 4.4 e todo o ensaio se orientou pela especificação do LNEC E 392-1993-Betões-Determinação de Permeabilidade ao Oxigénio [74], bem como os Procedimentos Experimentais do Ensaio de Permeabilidade ao Oxigénio elaborados pela U.B.I.



Figura 4.4 - Permeâmetro de oxigénio e água.

No seu funcionamento o permeâmetro coloca os corpos de prova sujeitos a uma pressão regulada pelo operador, sendo que o fluxo de oxigénio tem o sentido vertical descendente em relação ao corpo de prova. Para este ensaio foram utilizados corpos de prova do Tipo 2. Após serem retirados os corpos de prova da câmara de pré-condicionamento estes foram impermeabilizados lateralmente através de uma tinta plástica impermeável de modo a que o fluxo de ar se restrinja apenas a atravessar os corpos de prova uniaxialmente. Em seguida os provetes voltaram a ser colocados 24 horas novamente na câmara de pré-condicionamento com o intuito da tinta de impermeabilização ter uma devida secagem sem que fossem alteradas as condições de pré-condicionamento. Para se dar início ao ensaio propriamente dito, colocou-se o corpo de prova dentro de um cone de silicone que em ajuda com a tinta de impermeabilização o veda lateralmente por completo e foi colocado sob pressão dentro da célula. Passado uma hora de os corpos de prova estarem sob pressão dentro da célula de

forma a garantir um fluxo laminar foram registados para cada provete o tempos que uma bolha de sabão demora a percorrer determinada distância, neste caso foram admitidos 10 cm em uma pipeta de determinado diâmetro, neste caso 0,5mm e 10mm de diâmetro.



Figura 4.5 - Corpos de prova impermeabilizados lateralmente e célula onde são colocados sob pressão.

A permeabilidade do corpo de prova ao oxigénio,  $K$ , em  $m^2$  pode ser calculada com base na equação (4.3):

$$K = \frac{4,04 \times R \times L \times 10^{-16}}{A \times (P_2^2 - 1)} \quad (4.3)$$

$R$  - Fluxo do oxigénio à saída, em  $cm^3.s^{-1}$ .

$L$  - Espessura do corpo de prova, em m.

$A$  - Área da secção atravessada pelo oxigénio, em  $m^2$ .

$P_2$  - Pressão do oxigénio à entrada, em bar, sendo a pressão de saída de 1 bar.

#### 4.5.1.4 Determinação de permeabilidade à água

Em parte, este ensaio tem alguns passos idênticos ao ensaio de determinação da permeabilidade ao oxigénio e como nesse mesmo ensaio os corpos de prova não necessitam de ser destruídos para obtenção de resultados foram utilizados esses mesmos corpos de prova, do Tipo 2.

O início de este ensaio pode seguir-se ou não o de permeabilidade ao oxigénio, sendo vantajoso suceder este já que os corpos de prova se encontram dentro das células do

mecanismo necessário ao ensaio. Neste caso e como os corpos de prova a ensaiar se encontrarem no interior da célula introduziu-se uma solução de água álcool e fenolftaleína na parte superior da célula, para na fase em que se regista a profundidade de penetração o betão tomar uma cor rosada na zona interior até onde a solução conseguiu penetrar e colocou-se sob pressão com o objectivo de impor a penetração de água, uniaxilmente para o interior do corpo de prova cerca de uma hora. Em seguida, retirou-se da célula e com ajuda de uma prensa dividiu-se o provete longitudinalmente para se registarem os valores de penetração de água no interior.



Figura 4.6 - Profundidade da penetração da água.

Uma vez determinada a profundidade de penetração, o coeficiente de permeabilidade à água,  $k_w$ , em  $m \cdot s^{-1}$ , determina-se através da equação (4.4):

$$k_w = \frac{d_p^2 \times \delta}{2 \times h \times t} \quad (4.4)$$

Para converter o coeficiente de permeabilidade à água,  $k_w$ , em permeabilidade intrínseca,  $K_w$ , em  $m^2$ , uma vez que se utilizou apenas água, utiliza-se a equação (4.5):

$$K_w = 1,02 \times 10^{-7} \times k_w \quad (4.5)$$

#### 4.5.1.5 Ensaio de porosidade por intrusão de mercúrio

Com o objectivo de fazer uma análise da porosimetria do betão utilizado, realizou-se o ensaio de porosidade por intrusão de mercúrio. O ensaio realiza-se com o auxílio de um porosímetro

de mercúrio, Figura 4.7, que de uma técnica bastante poderosa é capaz de analisar poros de materiais tão pequenos quanto 10 nm.

Os inúmeros poros do betão são de formas bastante irregulares. Mas neste tipo de ensaio o porosímetro de mercúrio, assume que o volume total dos poros do corpo em betão equivale a um volume forma cilíndrica com raio determinado. O volume de mercúrio que penetra no interior do corpo de prova é em função da pressão aplicada. Durante o ensaio o corpo de prova é submetido a pressões sucessivamente crescentes.



Figura 4.7 - Microporosímetro de mercúrio.

No início do ensaio o ar é removido do interior do corpo criando um vácuo, o mercúrio penetra preenchendo todos os poros existentes, ou seja, uma intrusão de baixa pressão. Em seguida é retirado todo o mercúrio e repetida a intrusão, num movimento de alta pressão. Após completar os dois passos, o computador calcula o volume intrusão e extrusão acumulado tendo em conta o diâmetro do poro e a pressão utilizada.

Através de uma relação entre a pressão exercida e o menor diâmetro dos poros preenchidos com mercúrio pode ser analisado utilizando leis referentes à penetração de líquidos por capilaridade em poros de pequenas dimensões. Os resultados da análise são exibidos graficamente, sendo calculados pela equação de Washburn (4.5):

$$P = \frac{-2\gamma \cos \theta}{r} \quad (4.5)$$

Onde:

g- Tensão superficial do mercúrio.

$\theta$  - Ângulo de contacto com o material.

r- Raio determinado.

#### 4.5.1.6 Ensaio de análise termogravimétrica (TGA)

O ensaio de análise termogravimétrica (TGA) tem como objectivo determinar a composição química de um material, neste caso o betão. Através da temperatura esta técnica determina a quantidade proporcionada de todos os compostos presentes no betão.

Para o ensaio foi moído parte de um corpo de prova para obter uma muito reduzida granulometria, sendo posteriormente colocado no aparelho utilizado para este procedimento experimental, da marca TA Instruments®, modelo Q50®, Figura 4.9.



Figura 4.8 - Aparelho de ensaio TGA.

O dispositivo sujeita o corpo de prova a aumentos de temperatura de forma contínua até um valor máximo de 1000 °C. Para cada intervalo de aumento de temperatura o corpo de prova perde uma determinada massa. O dispositivo regista as perdas de massa no corpo de prova e elabora uma relação entre os intervalos de aumento de temperatura e a perda de massa na amostra.

Os resultados são obtidos num gráfico com uma curva de perda de massa e a sua derivada. Através da sua interpretação é possível identificar os elementos por que o material é composto, ou seja, a cada ponto de inflexão presente é referente à reacção e consequente

identificação de um determinado elemento. Assim, com este tipo de ensaio é possível distinguir num corpo de prova as zonas onde não ocorreu carbonatação e as zonas onde a carbonatação já ocorreu, porque identifica e determina a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$ . A determinação percentagem de  $\text{Ca(OH)}_2$  é obtida através das curvas de perdas de massa, Figura 4.10 com o auxílio das seguintes equações (4.5), (4.6) e (4.7), [75]:

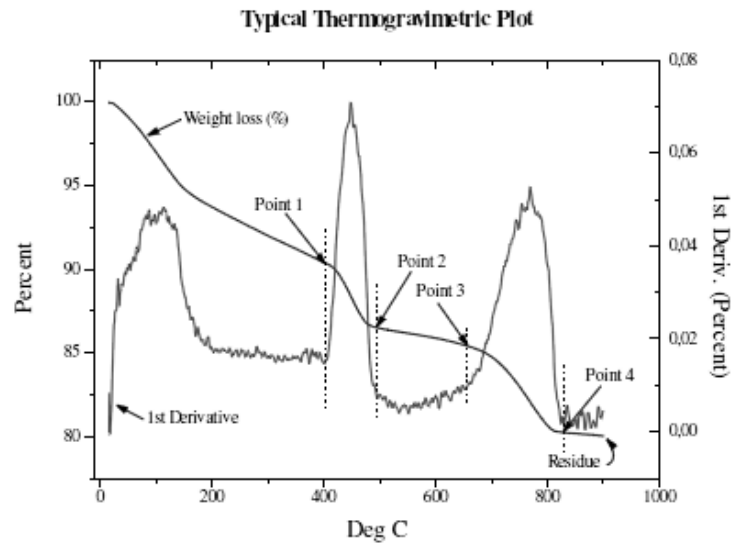


Figura 4.9 - Curva típica de ensaio termogravimétrico [75].

$$\% \text{Ca(OH)}_2 = res1 \left( \frac{74}{18} \right) + v4 \left( \frac{74}{44} \right) \quad (4.5)$$

$$res1 = \text{Point 1} - \text{Point 2} \quad (4.6)$$

$$v4 = \left( res2 \frac{100}{44} \right) - 10 \quad (4.7)$$

## 4.5.2 Características do betão

De forma a comprovar a credibilidade dos valores dos ensaios realizados fez-se uma comparação com resultados obtidos em outros estudos com ensaios semelhantes.

O Quadro 4.2 apresenta uma síntese dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização do betão.

Quadro 4.2 - Quadro síntese de caracterização do betão

| Classe de resistencia | Resistencia à compressão |                   |      |        | Determinação da absorção da água por capilaridade                    |  | Permeabilidade ao oxigénio              |   |        | Permeabilidade à água                                |   |        |
|-----------------------|--------------------------|-------------------|------|--------|--|--|---|---|--------|--|---|--------|
|                       | Tensão de rotura [Mpa]   | Carga máxima [KN] | S    | Cv [%] | Coefficiente de capilaridade [g/cm <sup>2</sup> min <sup>0,5</sup> ] | Coefficiente de absorção [kg/m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> ] | K x 10 <sup>-17</sup> [m <sup>2</sup> ] | S x 10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ] | CV [%] | K <sub>w</sub> x 10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ] | S x 10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ] | CV [%] |
| C30/37                | 46,3                     | 1087              | 2,05 | 4,43   | 0,41   | 0,32   | 4,52                                    | 0,72                                    | 15,93  | 2,8  | 0,01                                    | 1,59   |

Nota : S- desvio padrão; Cv - Coeficiente de variação

No ensaio de caracterização mecânica, o ensaio de verificação da resistência à compressão, os valores obtidos no Quadro 4.2 encontram-se perfeitamente dentro do intervalo previsto para um betão de classe de resistência C30/37 [74].

Em relação aos ensaios de permeabilidade o betão sujeito revelou-se muito pouco permeável, comparativamente a outros autores. Pereira [76], para um betão da mesma classe de resistência obteve um valor médio de permeabilidade ao oxigénio de  $1,36 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ . Já em relação ao valor obtido no ensaio de permeabilidade à água, Pereira [76], o betão obteve um valor médio de  $6,39 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ , valor bastante mais elevado do que o betão utilizado neste trabalho.

No ensaio de microporosímetro de mercúrio foi obtido um valor de porosidade de 11,17 %, valor este apenas ligeiramente inferior ao de Pereira [76], que com um betão da mesma classe de resistência C30/37 obteve um valor médio de 14,67 %.

Os resultados do ensaio da análise termogravimétrica do betão indicam que o hidróxido de cálcio resultante da hidratação,  $\text{Ca(OH)}_2$ , se encontra carbonatado, uma vez que só ocorreu perda de massa a partir de 650°C. Isto pode estar relacionado com a preparação das amostras, uma vez que seria de esperar que existisse hidróxido de cálcio não carbonatado. Ou seja, seria de esperar que na curva do decréscimo percentual de massa do corpo de prova se encontrassem dois grandes picos de função, mas na realidade só se regista um só, no intervalo de 650 °C- 750 °C. Desta forma o gráfico corresponde a um betão carbonatado, que o não

seria o caso. Uma possível explicação para situação é o facto da amostra de cimento moído ter sido carbonatado durante a execução do ensaio. De qualquer forma a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  pode ser calculada expressão 4.5, obtendo-se 16,94 %. Não tendo sido possível repetir o ensaio, por avaria do equipamento, na altura.

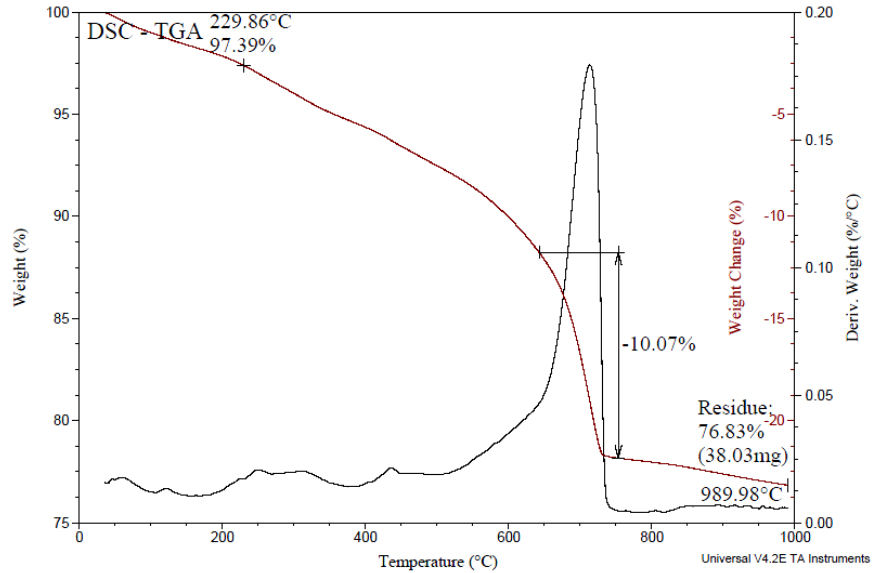


Figura 4.10 - Percentagens de perda de massa com análise termogravimétrica (TGA).

Em relação ao ensaio realizado para caracterização dos parâmetros de absorção de água por capilaridade, a norma francesa NFB 10 502 [72], classifica o betão como de muita fraca capilaridade e segundo a classificação do coeficiente de absorção segundo a norma alemã DIN 52617 [73], o betão é quase impermeável. As respectivas curvas de absorção obtidas estão representadas nas Figura 4.11 e Figura 4.12.

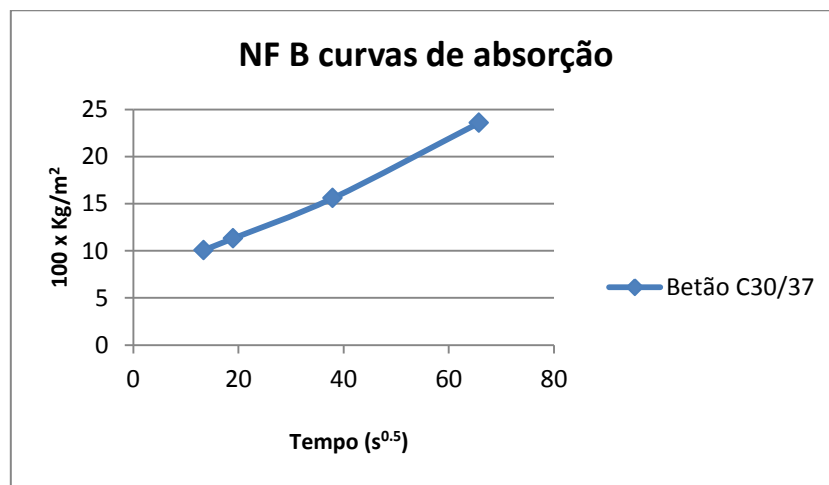


Figura 4.11 - Curva de absorção NFB 10 502.

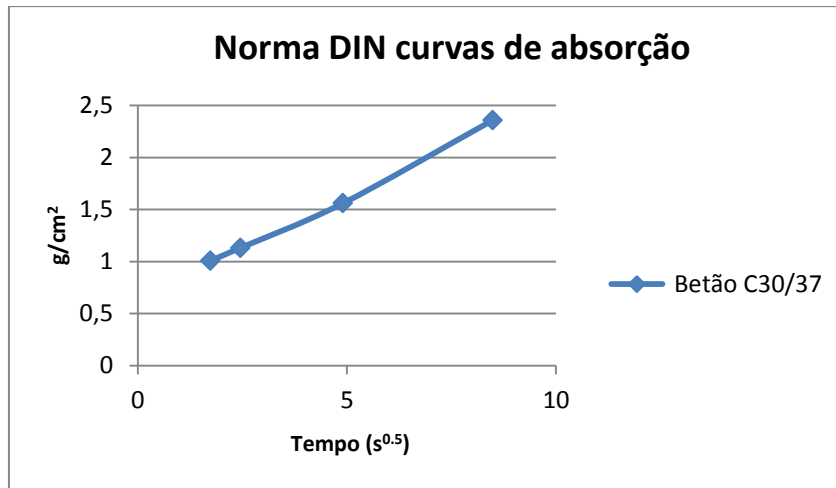


Figura 4.12 - Curva de absorção Norma DIN 52617.

Os resultados apresentados no Quadro 4.3 são valores médios obtidos a partir do ensaio de vários corpos de prova. Com os resultados obtidos dos ensaios, para além dos valores médios (4.8), foi também determinado o desvio padrão (4.9) e o coeficiente de variação (4.10) para os diferentes parâmetros avaliados.

$$\text{Valor médio} = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (4.8)$$

$$\text{Desvio padrão} = S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (4.9)$$

$$\text{Coeficiente de variação} = Cv = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (4.10)$$

# 5 Ensaio acelerado de carbonatação

## 5.1 Enquadramento

Um dos principais objectivos deste capítulo vai de encontro com o tema desenvolvido ao longo dos capítulos anteriores, a carbonatação no betão. Então, para se realizar o ensaio acelerado de carbonatação foram colocadas diversas concentrações de CO<sub>2</sub> e diversos teores de humidade relativa no dispositivo criado, a fim de verificar o efeito produzido no betão, pelas diferentes combinações a que os corpos de prova foram sujeitos. O ensaio acelerado de carbonatação, realizado em laboratório, pretende em tempo reduzido simular os danos que CO<sub>2</sub> provoca no betão a longo prazo.

Apesar de este fenómeno ser estudado há alguns anos, o método de estudo ainda não foi normalizado. Tendo em conta a revisão bibliográfica teve-se um cuidado especial de modo a que a metodologia aplicada não ser executada de modo indiscriminado.

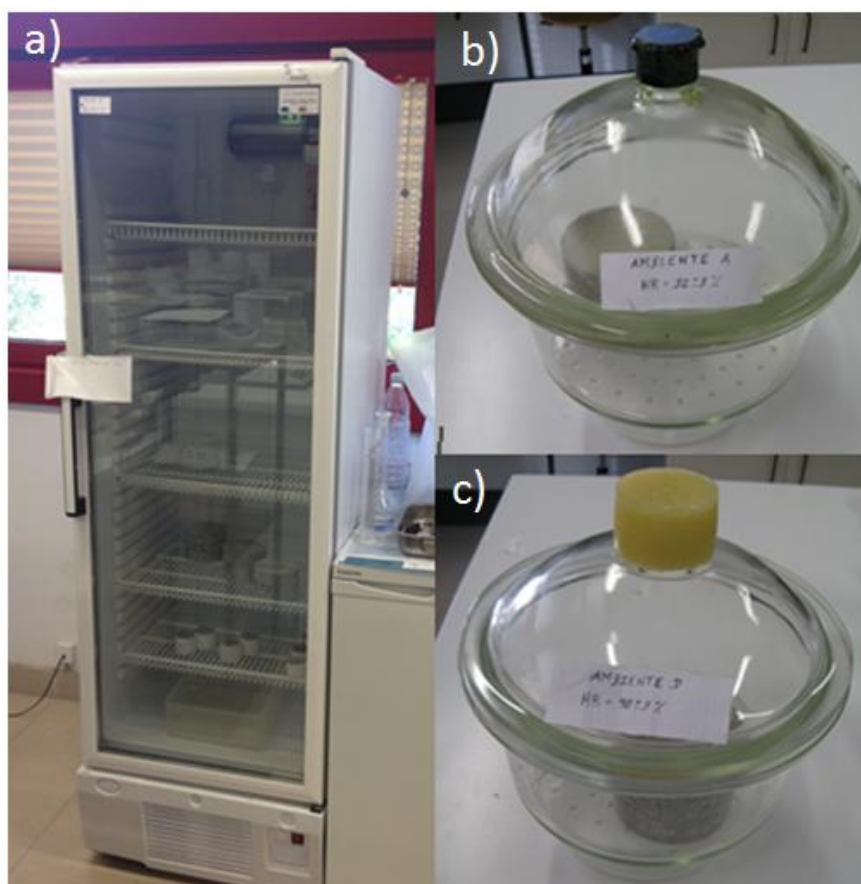
## 5.2 Pré-condicionamento

Conforme o pressuposto deste capítulo, a combinação de vários teores de humidade relativa e de concentrações de CO<sub>2</sub>, os corpos de prova destinados ao ensaio de carbonatação foram distribuídos por diferentes ambientes, em termos de humidade relativa Quadro 5.1. Este procedimento é executado para que no início do ensaio acelerado de carbonatação os corpos de prova estejam em pleno equilíbrio interiormente em termos de humidade. É necessário que os corpos de prova estejam em pleno equilíbrio com o teor de humidade relativa do ambiente, este factor é determinante pela sua influência no processo de carbonatação no betão. Os diferentes ambientes foram criados com o auxílio de soluções salinas, onde cada tipo de solução confere um diferente teor de humidade relativa ao meio onde se encontra, Figura 5.1. Para as condições necessárias foram utilizados Sulfato de Zinco, Cloreto de Sódio, Nitrato de Sódio e Cloreto de Cálcio para criar aproximadamente  $90 \pm 3 \%$ ,  $75 \pm 3 \%$ ,  $65 \pm 3 \%$   $32 \pm 3 \%$  de humidade relativa, respectivamente. Neste caso os corpos de prova permaneceram em pré condicionamento até duas pesagens do mesmo corpo de prova não conterem diferenças significativas, garantindo a homogeneidade da humidade no interior da matriz porosa do betão. Nesta etapa prévia à realização do ensaio acelerado de carbonatação fez-se medição da massa de cada corpo de prova totalmente seco (HR = 0%), ou seja antes de terem sido colocados nas respectivas câmaras e uma segunda medição da massa antes do início de cada ensaio realizado. Foi possível observar a diferença de acréscimo de massa que cada ambiente criado com soluções salinas produziu nos corpos de prova. Os respectivos valores de medições de massa estão descritos no Quadro 5.2.

**Quadro 5.1 - Ambientes criados para o período de pré-condicionamento**

| Solução Salina    | Humidade Relativa [%] | Ambiente |
|-------------------|-----------------------|----------|
| Cloreto de Cálcio | 32 ± 3                | A        |
| Nitrato de Sódio  | 65 ± 3                | B        |
| Cloreto de Sódio  | 75 ± 3                | C        |
| Sulfato de Zinco  | 90 ± 3                | D        |

Os diversos teores de humidade relativa criados, acarretam uma variação de 3 % cada. O motivo da intromissão desta ligeira margem é relativo à consideração de variações térmicas provocadas pelos ciclos dia/noite.



**Figura 5.1 - Câmaras de criação de diferentes ambientes de pré-condicionamento.**

**Quadro 5.2 - Variação total dos corpos de prova no Ambiente D (HR= 32 ± 3 %)**

| Corpo de prova | Massa [g] |              | Diferença [g] | Variação [%] |
|----------------|-----------|--------------|---------------|--------------|
|                | HR= 0 %   | HR= 32 ± 3 % |               |              |
| 5S1            | 1471,58   | 1474,13      | 2,55          | 0,17         |
| 5S8            | 1559,48   | 1561,07      | 1,59          | 0,10         |
| 5S9            | 1471,66   | 1473,28      | 1,62          | 0,11         |
| 5S13           | 1462,24   | 1463,51      | 1,27          | 0,09         |

**Quadro 5.3 - Variação total dos corpos de prova no Ambiente D (HR= 65 ± 3 %)**

| Corpo de prova | Massa [g] |              | Diferença [g] | Variação [%] |
|----------------|-----------|--------------|---------------|--------------|
|                | HR= 0 %   | HR= 65 ± 3 % |               |              |
| 5S4            | 1445,22   | 1449,55      | 4,33          | 0,30         |
| 5S5            | 1499,72   | 1503,38      | 3,66          | 0,24         |
| 5S6            | 1547,54   | 1551,68      | 4,14          | 0,27         |
| 5S14           | 1479,96   | 1483,62      | 3,66          | 0,25         |

**Quadro 5.4 - Variação total dos corpos de prova no Ambiente D (HR= 75 ± 3 %)**

| Corpo de prova | Massa [g] |              | Diferença [g] | Variação [%] |
|----------------|-----------|--------------|---------------|--------------|
|                | HR= 0 %   | HR= 75 ± 3 % |               |              |
| 5S3            | 1532,43   | 1536,16      | 3,73          | 0,24         |
| 5S11           | 1509,48   | 1512,63      | 3,15          | 0,21         |
| 5S16           | 1575,34   | 1579,39      | 4,05          | 0,26         |
| 5S18           | 1438,76   | 1443,27      | 4,51          | 0,31         |

**Quadro 5.5 - Variação total dos corpos de prova no Ambiente D (HR= 90 ± 3 %)**

| Corpo de prova | Massa [g] |              | Diferença [g] | Variação [%] |
|----------------|-----------|--------------|---------------|--------------|
|                | HR= 0 %   | HR= 90 ± 3 % |               |              |
| 5S2            | 1503,34   | 1507,73      | 4,39          | 0,29         |
| 5S12           | 1541,72   | 1546,28      | 4,56          | 0,30         |
| 5S17           | 1457,98   | 1462,89      | 4,91          | 0,34         |
| 5S20           | 1404,99   | 1410,34      | 5,35          | 0,38         |

### 5.3 Procedimento de ensaio

Neste ensaio criaram-se diferentes combinações entre concentrações de CO<sub>2</sub>, diferentes teores de humidade relativa, com um valor aproximadamente constante de temperatura. A partir destas diferentes combinações são criadas diferentes exposições ambientais a que os corpos de prova vão ser sujeitos. As distribuições de combinações atrás referidas estão representadas no Quadro 5.6.

**Quadro 5.6** - Condições de exposição a realizar no ensaio acelerado de carbonatação.

| Ambiente | Humidade Relativa [%] | Concentração de CO <sub>2</sub> [%] | Temperatura [°C] |
|----------|-----------------------|-------------------------------------|------------------|
| A        | 32 ± 3                | 15 ± 2                              | 18,5 ± 2         |
|          |                       | 30 ± 2                              |                  |
|          |                       | 60 ± 2                              |                  |
| B        | 65 ± 3                | 15 ± 2                              |                  |
|          |                       | 30 ± 2                              |                  |
|          |                       | 60 ± 2                              |                  |
| C        | 75 ± 3                | 15 ± 2                              |                  |
|          |                       | 30 ± 2                              |                  |
|          |                       | 60 ± 2                              |                  |
| D        | 90 ± 3                | 15 ± 2                              |                  |
|          |                       | 30 ± 2                              |                  |
|          |                       | 60 ± 2                              |                  |

O ensaio acelerado de carbonatação foi realizado no dispositivo desenvolvido no capítulo 3 e utilizaram-se corpos de prova do tipo 2. Repetiu-se o ensaio 12 vezes, ou seja, cada ambiente, A, B, C, D foi combinado com 3 teores de CO<sub>2</sub>, Quadro 5.6.

A metodologia de ensaio é baseada no funcionamento do dispositivo, descrito no ponto 3.3.4, na especificação do LNEC E391 [61] e também na RILEM (1988) CPC-18 [62]. Cada ensaio teve a duração de 72 horas e a cada intervalo de 24 horas de duração era repostado o teor inicial de CO<sub>2</sub> estabelecido. Quando concluídas as 72 horas de ensaio é retirado o corpo de prova e levado para uma prensa que fractura o corpo de prova radialmente. Em seguida é executada uma aspersão de fenolftaleína nas faces fracturadas e são registados as profundidades. A medição da profundidade da frente de carbonatação foi realizada sensivelmente 1 hora após ser aspergida a fenolftaleína, para a frente de carbonatação se encontrar mais bem definida.

No procedimento adoptado pela RILEM (1988) CPC-18 [62], está definido que a medida deve ser obtida após 24 horas da aspersão, mas neste caso foi adoptado o intervalo de uma hora devido a coloração rosa-carmim perder intensidade após esse longo período, o que dificulta a visualização da profundidade de carbonatação. Para referência foram também registadas as profundidades de carbonatação presente em corpos de prova apenas sujeitos ao processo de pré-condicionamento, ou seja, sem serem sujeitos a elevadas concentrações de CO<sub>2</sub>. A medição foi realizada in-situ com o auxílio de um paquímetro. A medição foi executada da seguinte forma: colocou-se o paquímetro em cada lateral da face fracturada do corpo de prova e registou-se o valor máximo e mínimo, em seguida fez-se uma média da profundidade da face, Figura 5.3.

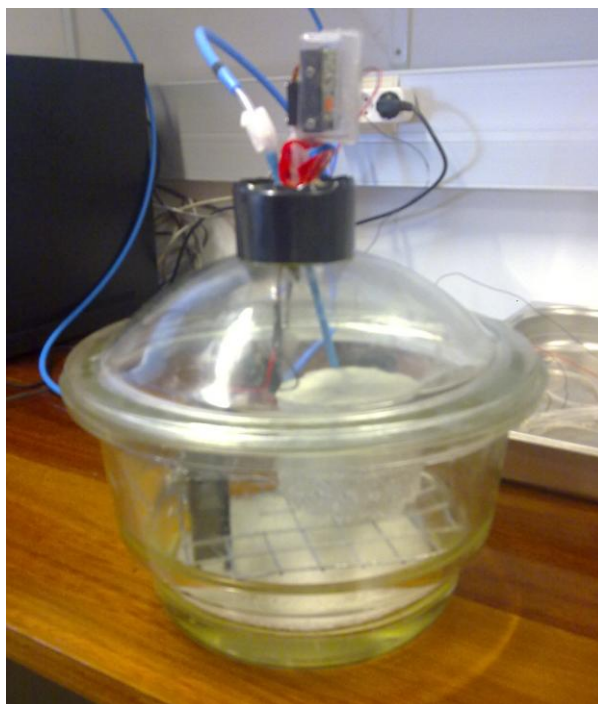


Figura 5.2 - Ensaio de carbonatação acelerada.



Figura 5.3 - Medição da profundidade de carbonatação.

## 5.4 Profundidades de carbonatação

Na medição da profundidade da frente de carbonatação, apenas foram consideradas as medidas laterais dos corpos de prova. Foram dispensadas a profundidade superior e inferior devido a discrepância de profundidades entre elas [27]. Na Figura 5.3 está representada a técnica efectuada na medição das diferentes profundidades de carbonatação obtidas. Não

sendo as faces fracturadas perfeitamente planas, julga-se que esse factor não acarrete grande desvio aos valores registados. Os resultados de profundidade obtidos, são apresentados em milímetros e encontram-se no Quadro 5.3.



Figura 5.4 - Medidas da profundidade de carbonatação.

Onde:

**M1** - Maior profundidade lateral esquerda

**m1** - Menor profundidade lateral esquerda

**M2** - Maior profundidade lateral direita

**m2** - Menor profundidade lateral direita

Quadro 5.7 - Profundidades de carbonatação obtidas nas diferentes condições.

| Ambiente | Humidade Relativa [%] | Concentração de CO2 [%] | Profundidades [mm] |      |      |      |       |
|----------|-----------------------|-------------------------|--------------------|------|------|------|-------|
|          |                       |                         | M1                 | m1   | M2   | m2   | Média |
| A        | 32 ± 3                | 15 ± 2                  | 0,35               | 0,18 | 0,21 | 0,09 | 0,21  |
|          |                       | 30 ± 2                  | 3,15               | 2,78 | 3,30 | 2,95 | 3,05  |
|          |                       | 60 ± 2                  | 5,85               | 4,75 | 5,44 | 5,16 | 5,30  |
| B        | 65 ± 3                | 15 ± 2                  | 1,53               | 1,38 | 1,65 | 1,56 | 1,53  |
|          |                       | 30 ± 2                  | 6,62               | 6,46 | 6,53 | 6,45 | 6,52  |
|          |                       | 60 ± 2                  | 9,55               | 9,25 | 9,30 | 9,20 | 9,33  |
| C        | 75 ± 3                | 15 ± 2                  | 1,21               | 1,16 | 1,32 | 1,14 | 1,21  |
|          |                       | 30 ± 2                  | 5,45               | 5,05 | 5,08 | 5,03 | 5,15  |
|          |                       | 60 ± 2                  | 7,87               | 7,62 | 8,13 | 7,75 | 7,84  |
| D        | 90 ± 3                | 15 ± 2                  | 0,42               | 0,27 | 0,35 | 0,31 | 0,34  |
|          |                       | 30 ± 2                  | 2,91               | 2,66 | 2,75 | 2,59 | 2,73  |
|          |                       | 60 ± 2                  | 4,97               | 4,85 | 5,14 | 4,90 | 4,97  |

Nota: Os valores de profundidade estão dentro de uma margem de erro de 0,05 mm.

Foi também realizada uma medição de profundidade de carbonatação a um corpo de prova de cada ambiente criado, mas nas condições de ensaio não foi introduzida uma elevada concentração de CO<sub>2</sub>, o corpo de prova apenas foi sujeito à concentração de CO<sub>2</sub> presente no laboratório, cerca de 0,30 %. As medidas não foram consideradas no Quadro 5.7 porque se revelaram insignificantes, portanto foi admitido o valor de 0 mm de profundidade.

Como foi já evidenciado, a comparação dos resultados de profundidades obtidos neste estudo com resultados obtidos por outros investigadores, torna-se difícil de realizar por diversos motivos. Basta apenas variar uma propriedade do betão utilizado para se obterem resultados bastante diferentes. As condições de pré-condicionamento, o tipo de cura e o tipo de cimento são alguns dos inúmeros factores que tornam difícil a comparação de resultados. No entanto para este estudo, tentou-se relacionar as profundidades de carbonatação obtidas. Salomão e Silva realizaram uma pesquisa acerca de carbonatação acelerada com algumas condições que se aproximam bastante às empregadas no presente estudo. Utilizaram corpos de prova cilíndricos e executaram uma rotura diametral, realizaram um pré-condicionamento de 14 dias e criaram um ambiente de aproximadamente 35 % de humidade relativa. Contudo não existe referência à concentração real de CO<sub>2</sub> utilizada, devido à inexistência de monitorização. Apenas é aludido que no final do ensaio o valor é aumentado bruscamente para 95 %. A profundidade obtida no ensaio para aos 7 dias foi de 3,57 mm. O valor obtido é relativamente equivalente aos resultados referentes ao Ambiente A, (32 ± 3%). Mais uma vez o estudo da carbonatação revela a sua grande limitação, a ausência de uma norma experimental.



## 6 Conclusões e recomendações futuras

O objectivo principal deste estudo foi conseguido. O dispositivo desenvolvido revela-se adequado para realizar o ensaio acelerado de carbonatação, com diferentes teores de CO<sub>2</sub> e de humidade relativa. É extremamente útil em ensaios onde as condições ambientais são mantidas constantes no decorrer do ensaio. O dispositivo foi construído especificamente para avaliação da influência que o CO<sub>2</sub>, conjugado com outros factores tem na durabilidade dos materiais, sendo totalmente capaz de realizar diversos estudos onde a carbonatação é o objecto principal. Caso seja necessário transporte do dispositivo este pode ser montado de uma forma rápida e relativamente fácil. É um facto que com a instalação do sensor é possível obter concentrações de CO<sub>2</sub> reais e válidas que podem ser verificadas a cada instante, deixando de ser necessário calcular a concentração com uma relação de volume da camara e fluxo do gás fornecido, um método utilizado por alguns autores que não possuíam um sistema de monitorização durante o decorrer ensaio. No decorrer do desenvolvimento do dispositivo foi necessária a colocação de sistema de ventilação. Após a sua instalação homogeneizou-se o teor do CO<sub>2</sub> no ambiente de ensaio. Também se revelou muito eficiente em relação à segurança. O CO<sub>2</sub> é um gás que se pode tornar letal e este dispositivo não possui vazamento. Por outro lado, o dispositivo possui algumas limitações. O seu manuseamento é manual, sendo necessário fazer manualmente a reposição de CO<sub>2</sub> para equilibrar o teor do gás. Assim no desenrolar do ensaio acelerado de carbonatação é necessário um operador que controle periodicamente o dispositivo. No caso de se pretenderem realizar ensaios em sobrepressão, este dispositivo não é o mais aconselhado, porque um exsiccador trabalha bastante bem em subpressão e não no inverso.

Quanto ao ensaio realizado, a utilização de elevadas concentrações de forma proporcionada, permitiu que as profundidades obtidas fossem bastante razoáveis, com limites bem definidos de modo a se efectuar uma boa medição. As relações dos ambientes criados e das profundidades de carbonatação obtidas e encontram-se dentro do esperado. As maiores profundidades foram registadas quando se submeteram os corpos de prova ao Ambiente B (HR= 65 ± 3 %), Este ambiente encontra-se dentro do intervalo que a grande maioria dos autores defende como sendo o intervalo óptimo para o processo de difusão do CO<sub>2</sub> para o interior do betão, factor de elevada importância no desenvolvimento da carbonatação. Foi visível também que a difusão do CO<sub>2</sub> se processou mais dificilmente no ambiente mais húmido (HR=90 ± 3 %) do que no ambiente mais seco (HR=32 ± 3 %). Estas relações obtidas foram possíveis devido a um bom processo de pré-condicionamento, foi conseguida uma boa distribuição da humidade relativa na matriz porosa do betão.

Em relação à caracterização do betão utilizado o betão utilizado possui boas características de durabilidade, boa resistência à compressão, baixa permeabilidade e porosidade que lhe

conferem um grau de protecção de ataques químicos. O resultado do ensaio de análise termogravimétrica estranhamente não foi o esperado, mas em contrapartida as medições de profundidade efectuadas nos corpos de prova que não foram submetidos a elevados teores de CO<sub>2</sub> não apresentavam profundidade relevante.

Este estudo ficou ligeiramente limitado em relação à quantidade e variáveis de ensaio empregadas. Em relação ao estudo da carbonatação muito pode ser feito ainda e este estudo não é exceção. Recomenda-se que com a utilização deste modelo de dispositivo seja possível realizar mais ensaios e assim prever correctamente o tempo de vida útil de estruturas em betão armado. Aqui ficam alguns exemplos de casos estudo possíveis de realizar futuramente, tal como a formulação de um modelo matemático de previsão de profundidade de carbonatação para uma determinada mistura. Verificação da influencia de parâmetros característico. A introdução de um sistema capaz de simular os tempos de molhagem/secagem previstos na Modelação da humidade relativa e do tempo de molhagem do betão nas classes de exposição EN 206-1. No entanto com este estudo foi dado mais um passo para que outros estudos futuros possam adoptar um tipo de dispositivo e metodologia de ensaio idêntica, com a finalidade de obter um relacionamento dos dados obtidos por cada estudo.

# Bibliografia

- [1] ANDRADE, J.J.O.A.; “Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no Estado de Pernambuco”; Dissertação (Mestrado), Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997
- [2] [NASA - última medição do Global Climate Change/NASA, em Agosto de 2013. Disponível em: <http://climate.nasa.gov/keyIndicators/>]
- [3] TUUTTI, K.; “Corrosion of steel in concrete”; Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.
- [4] PARROTT, L. J.; “A review of carbonation in reinforced concrete”; Wexham Springs, Cement and Concrete Association, 1987.
- [5] MONTEIRO, Isabel F. G.; “Modelação da evolução da carbonatação em elementos de betão armado”; Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010.
- [6] SCHRODER, F. & SMOLCZYK, H. G.; “Carbonation and protection against steel corrosion”; Fifth International Symposium Chemistry of Cement, vol. 4, Tokyo, 1968.
- [7] SMOCZYK, H. G.; “Discussion of principal paper of carbonation of concrete”; Fifth International Symposium Chemistry of Cement, III part, Tokyo, 1968.
- [8] YATES, T.; “The effects of air pollution on the built environment”; Imperial College Press, 2003.
- [9] GOUVEIA, Rui M.; “AVALIAÇÃO DE ENSAIOS DE DURABILIDADE DO BETÃO”; Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, 200
- [10] HELENE, P. R. L.; “Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado”; Tese (Livre docência), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; São Paulo, 1993.
- [11] BROOMFIELD, J. P.; “Corrosion of steel in concrete - Understanding Investigation and Repair”; E& FN SPON, London/New York, 1997.

[12] VAGGHETTI, M. A. O. ; “ESTUDO DA CORROSÃO DO AÇO, INDUZIDA POR CARBONATAÇÃO, EM CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS”; Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia, Porto Alegre, 2005

[13] NEVILLE, A M.; “Propriedades do concreto”; 2 edição São Paulo: Pini, São Paulo, 1997.

[14] PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N.; “Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation”; ACI Materials Journal, n. 88, Jul. /Aug., 1991b.

[15] PARROT, L. J.; “A review of carbonation in reinforced concrete”; Wexham Springs, Cement and Concrete Association, 1986.

[16] FERREIRA Rui M.: “AVALIAÇÃO DE ENSAIOS DE DURABILIDADE DO BETÃO”; Dissertação apresentada à Escola de Engenharia do Minho para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - Materiais e Reabilitação da Construção, Escola de Engenharia Universidade do Minho, Guimarães, 2000.

[17] Neville, A.M.; “Proprieties of concrete”; Pearson Education Limited, England, 2008.

[18] SALTA, M. M.; “*Introdução à corrosão do aço no betão*”; *Modelos de comportamento às acções agressivas*, Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado, Seminário, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Outubro 1996.

[19] COSTA, A. ; “Anomalias e Mecanismos de deterioração”, Módulo 2, Apontamentos da Cadeira de Reabilitação e Reforço Estrutural, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1999.

[20] SAETTA, A. V.; VITALIANI, R. V.; “Investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures”; Part I: Theoretical formulation, Cement and Concrete Research, v. 34. N. 4, p.571-579, April, 2004.

[21] KAZMIERCZAK, C. S.; “Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre as estruturas de concreto armado com o objectivo de protecção contra a carbonatação”; Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

[22] HO, D. W. S.; LEWIS, R. K.; “Carbonation of concrete and his prediction”; Cement and Concrete Research, v.17, n.3, 1987b

[23] PAULETTI, C. “Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de Carbonatação”; Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação

em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

[24] KULAKOWSKI, M. P.; “Contribuição ao estudo da carbonatação de concretos e argamassas compostos com adição de sílica activa”; Tese (Doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

[25] BAKKER, R.F.M.; “Initiation period”; SCHIESSL, P. (Ed.) Corrosion of Steel in Concrete: report of technical committee 60CSC RILEM, London, 1988.

[26] PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C.; “Carbonatação acelerada - estado da arte das pesquisas no Brasil”; Ambiente Construído, v. 7, n. 4, 2007.

[27] PAULETTI, C.; “Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição”; Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

[28] ANDRADE, C.; “Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras”; São Paulo, 1992.

[29] ROY, S.K.; BENG, P.K.; NORTHWOOD, D.O.; “The carbonation of concrete structures in the tropical environment of Singapore and a comparison with published data for temperate climates”; Magazine of Concrete Research, v.48, n.177, December 1993.

[30] ROY, S.K.; POH, K.B.; NORTHWOOD, D.O.; “Durability of concrete - accelerated carbonation and weathering studies”; Building and Environment, v.34, 1999.

[31] HOUST, Y. F.; SADOUKI, H.; WITTMANN, F. H.; “Influence of aggregate concentration on the diffusion of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>”; INTERFACES IN CEMENTITIOUS COMPOSITES by RILEM International Conference, Toulouse, 1992.

[32] PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N.; “Reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation”; AIChE Journal. v. 35, n. 10, October 1989.

[33] YING-YU, L.; QUI-DONG, W.; “The mechanism of carbonation of mortars and the dependence of carbonation on pore structure”; CONCRETE DURABILITY, ACI, Detroit, 1987

[34] HELENE, P. R. L.; “Corrosão em armaduras para concreto armado”; Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo: Pini, 1986.

[35] FIGUEIREDO, E. J. P., HELENE, P. R. L., ANDRADE, C.; “Factores Determinantes

da Iniciação e Propagação da Corrosão da Armadura de Concreto”; Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

[36] THOMAS, M.; MATTHEWS, J. D.; “Carbonation of Fly Ash Concrete”; Magazine of Concrete Research, v.44, September 1992.

[37] ATIS, C. D.; “Heat evolution of high-volume fly ash concrete”; Cement and Concrete Research, v. 32, n. 5, 2002.

[38] LO, Y.; LEE, H. M.; “Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy”; Building and Environment, v. 37, n. 5, May 2002.

[39] PAPADAKIS, V. G.; “Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress”; Cement and Concrete Research, v. 30, n. 2, February 2000.

[40] COSTA, M. P.; SILVA, M. G.; PINHEIRO, S. M. M.; SOUZA, F. L. S.; ZANDONADE, E.; COELHO, M. A. M.; MORIMOTO, T.; “Concretos com altos teores de escória de alto forno: avaliação da carbonatação e da difusão de íons cloreto”; Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON, 47. Recife, 2005.

[41] CHI, J. M.; HUANG, R. YANG, C. C.; “Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method”; Journal of Marine Science and Technology, Vol. 10, No. 1, 2002.

[42] CUNHA DA, A. C. Q.; HELENE, P.R.L.; “ Despassivação das armaduras de concreto por acção da carbonatação”; Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil., São Paulo, 2001.

[43] PAPADAKIS, V. G.; “Hydration and carbonation of pozzolanic cements”; ACI Materials Journal. n. 89, Mar/Apr 1992.

- [44] BRANCA, C.; FRATESI, R.; MORICONI, G.; SIMONCINI, S.; “Influence of fly ash on concrete carbonation and rebar corrosion”; Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI, Istanbul, 1993.
- [45] ISAIA, G. C.; “Carbonatação do concreto - uma revisão”; Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.
- [46] COUTINHO, M. A. S.; “Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem”; FEUP, Porto, 2005.
- [48] COUTINHO, A. S.; “Fabrico e propriedades do betão”; LNEC, Lisboa, 2006.
- [49] TULA, L. S.; “Contribuição ao estudo da resistência à corrosão de armaduras de aço inoxidável”; Tese (Doutorado); Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- [50] PAPADAKIS, V. G. VAYENAS, C. G., FARDIS, M. ; “Fundamental concrete carbonation model and application to durability of reinforced concrete”; Durability of Building Materials and Components ,Brighton,1990p.
- [51] TAYLOR, H. F. W. ; “Cement chemistry”; Academic Press, London, 1990.
- [52] NOGUEIRA, R. P.; “A corrosão do aço em concreto - Influência do pH e do potencial de eléctrodo.”; Dissertação (Mestrado), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1989.
- [53] GJØRV, O. E.; “High-strength concrete” Advances in Concrete Technology, Athens, 1992.
- [54] KURTIS, K. E.; NETHA, P. K.; “A critical review of deterioration of concrete due to corrosion of reinforcing steel” Durability of concrete-Fourth CANMET/ACI International Conference, Sydney, 1997.
- [55] POSSAN, E.; “CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA EM AMBIENTE NATURAL E ACELERADO”; Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio do Sul, Porto Alegre, 2004.
- [56] JOHN, V. M.; “Avaliação da durabilidade de materiais e componentes e edificações: emprego do índice de degradação”; Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 1987.

- [57] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 632: standard recommended practice for developing short term accelerated test for prediction of the service life building components and materials, Philadelphia, 1978, rev. 1982. reapproved, 1996.
- [58] NIREKI, T.; “Examination of durability test methods for building materials based on performance evolution”, International Conference on Durability of Building Materials and Components, 1. Ottawa, 1978.
- [59] NEPOMUCENO, A. A.; “Comportamiento de los morteros de reparacion frente a la carbonatacion y a la penetracion de cloruros en estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras - estudio mediante la tecnica de resistencia de polarizacion”; Tesis (Doctoral), Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, 1992.
- [60] THIERY, M.; “Modélisation de la carbonatation atmosphérique des bétons - Prise en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique”; Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2005.
- [61] LNEC Especificação E 391- 1993 -Betões. Determinação da resistência à carbonatação.
- [62] RILEM RECOMMENDATIONS-TC56-CPC-18 (1988). “*Measurement of hardened concrete carbonation depth*”.
- [62] PARROTT; “Modeling of Hydration reactions and concrete properties”; Materials Science of Concrete, American Ceramic Society, v. 1, 1989.
- [64] NP EN 206-1:2007- Especificação, desempenho, produção e conformidade.
- [65] GREENSPAN, L. “Humidity, fixed points of binary saturated aqueous solutions”; Journal of research of the National Bureau of Standards, volume 81A, 1977.
- [66] YOUNG, J.F.; “Humidity Control in the Laboratory Using Salt Solutions-A Review”; *Journal of Applied Chemistry*, 1985.
- [67] RILEM TECHNICAL COMMITTEES - RILEM TC 116 - PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability.
- [68] GOMES, J.P. Castro, WANG, D., OLIVEIRA, L.A. Pereira de, FERREIRA, R.M.; “Study of preconditioning procedures for absorption and permeability of concrete”; International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto, 2011.
- [69] LNEC, Especificação E 226 - 1968 - Betão. Ensaio de Compressão.

[70] EN 1015-11, EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION- (CEN) - Methods of test for mortar masonry- Part 11: *Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. Brussels: CEN; November 1999.

[71] LNEC, Especificação E 393 - 1993 - Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade.

[72] NFB 10 502:1980- Measurement of water absorption by capillary attraction

[73] Norm DIN 52617:1987-05-Determination of the water absorption coefficient of construction

[74] LNEC- Especificação E 392 - 1993 - Betões. Determinação da Permeabilidade ao Oxigénio.

[75] CASTRO-GOMES, J. “Mathematical models for assessing hydration and microstructure of cement pastes.” Ph.D. Thesis, University of Leeds, U.K., 1996.

[76] PEREIRA, Cristiana N. G., “Estudo da influência de diferentes tipos de agregados no betão estrutural: Durabilidade e zona de interface”, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2005.