



**FCTUC** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Resistência à Carbonatação de Betões Ativados Alcalinamente**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil  
na Especialidade de Construções

Autor

**José Tiago Godinho Pereira da Silva**

Orientador

**Prof. Fernando José Forte Garrido Branco**

**Prof. Daniel António Semblano Gouveia Dias-da-Costa**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Julho, 2013**

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os meus colegas de curso, que ao longo destes anos participaram no meu trajeto académico e que ao partilhar comigo as suas opiniões, experiências e ideias, enriqueceram o meu desenvolvimento pessoal e intelectual.

Ao professor Fernando Branco e ao professor Daniel Dias-da-Costa pela orientação, apoio e pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao engenheiro Luís Ferreira o meu profundo agradecimento pela amizade e por toda a disponibilidade, incentivo, preocupação e aprendizagem proporcionada.

A todos os professores que, ao longo da minha formação, contribuíram com todo o seu conhecimento e sabedoria.

Às empresas SIKA, PRÉGAIA e SECIL, por cederem os materiais necessários à realização do trabalho experimental.

A todos os meus amigos por estarem sempre presentes, nos bons e maus momentos e por todo o espírito de entreaajuda e disponibilidade demonstrada.

Aos meus pais, irmã e restante família por todo o apoio, carinho, preocupação e por fazerem com que fosse possível atingir este nível de formação.

## RESUMO

A sustentabilidade é, hoje em dia, uma prioridade para a comunidade científica. No que diz respeito ao setor da construção, o desenvolvimento de materiais eco-eficientes e duráveis é um aspeto chave. O aumento de estruturas degradadas, em todo o mundo, faz com que haja uma preocupação crescente no que diz respeito à durabilidade do betão.

O cimento Portland (CP) tem um grande impacto ambiental associado à sua produção, devido ao processo de calcinação da pedra calcária e combustão de combustíveis fósseis, daí que um desenvolvimento que permita reduzir parcial ou totalmente o uso de CP, como os ligantes ativados alcalinamente (LAA), possa tornar estes materiais mais sustentáveis.

Os LAA, teoricamente, podem ser formulados com qualquer composto rico em sílica e alumina, dissolvido numa solução alcalina. A ativação alcalina de resíduos, ricos em sílica e alumina teve início nos finais dos anos 1930, tendo desde então sido estudados e existindo alguns exemplos de aplicação prática.

Este trabalho está inserido num projeto de investigação, e possui como objetivo principal o estudo da durabilidade de betões ativados alcalinamente (BAA). De forma a medir os parâmetros de durabilidade do BAA, são efetuados ensaios normalizados de resistência à carbonatação, de absorção de água por capilaridade e resistividade elétrica em diferentes tipos de betões: duas misturas diferentes de BAA; uma mistura produzida com CP normal para servir de referência; e por fim outra mistura de betão de elevado desempenho. Neste estudo, é também estudada a influência do efeito de uma camada protetora na resistência à carbonatação dos betões, comparando-se três soluções comerciais.

Com base neste estudo pode concluir-se que o BAA apresenta pior desempenho que o betão com CP e que a camada protetora tem influência na durabilidade de betão.

## ABSTRACT

Sustainability is nowadays a priority for the scientific community. The development of eco-efficient materials and its durability are key issues in the construction sector. Since degraded structures are increasing worldwide, there is an increasing concern regarding the durability of concrete.

The production of Portland cement (PC) has a large environmental impact since it requires the calcination of limestone and combustion of fossil fuels. Thus, the development of concrete with partial or total PC replacement, e.g. with alkali-activated binders (AAB), is crucial for the material sustainability.

Theoretically, AAB can be obtained using any compound with high concentration of silica and alumina, which is then dissolved in an alkaline solution. Alkaline activation of waste rich in silica and alumina began in the late 1930s. Since then, it has been thoroughly studied, existing several examples of practical application.

This study is part of a broader research project and has the main objective of studying the durability of alkali-activated concrete (AAC). Standard tests are carried out to assess carbonation resistance, capillary water absorption and electrical resistivity in different concrete mixtures: two different AACs mixtures; one normal concrete mixture used as reference; and, finally, an ultra-high performance concrete mixture. This study also addresses the importance of using protective coatings on the carbonation resistance of the specimens, being compared three commercial packages.

Based on this study one may imply that the AAC presents a worst performance than the PC concrete and that the protective coatings influences the durability of concrete.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	v
ÍNDICE DE QUADROS.....	vii
SIMBOLOGIA .....	viii
ABREVIATURAS.....	x
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Considerações Gerais e Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Organização da Dissertação .....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Betão Ativado Alcalinamente.....	3
2.1.1 Retrospectiva Histórica.....	3
2.1.2 Ativadores Alcalinos.....	5
2.1.3 Matéria-prima .....	5
2.1.4 Composição Química.....	5
2.1.5 Aplicações do BAA .....	7
2.1.6 Durabilidade do BAA .....	10
2.2 Resistência à carbonatação do betão.....	14
2.2.1 Descrição.....	15
2.2.2 Estudos e Normas .....	18
2.2.3 Modelos analíticos e numéricos .....	20
2.2.4 Mecanismos de proteção do betão.....	20
3 TRABALHO EXPERIMENTAL .....	22
3.1 Descrição dos Parâmetros em Estudo.....	22
3.2 Caracterização dos Materiais.....	22
3.2.1 Ligante Base.....	22
3.2.2 Ativador Alcalino .....	23
3.2.3 Cimento Portland Normal .....	23
3.2.4 Água.....	24
3.2.5 Agregados .....	24
3.2.6 Tintas.....	26
3.3 Constituição das misturas.....	27
3.4 Produção e cura dos provetes .....	28
3.5 Descrição dos Métodos de Ensaio .....	29
3.5.1 Resistência à compressão.....	29

---

3.5.2	Absorção de Água por Capilaridade.....	29
3.5.3	Carbonatação.....	31
3.5.4	Resistividade Elétrica.....	33
4	RESULTADOS E ANÁLISE.....	36
4.1	Apresentação e análise dos resultados.....	36
4.1.1	Resistência à compressão.....	36
4.1.2	Absorção de Água Por Capilaridade.....	37
4.1.3	Carbonatação Acelerada.....	41
4.1.4	Resistividade Elétrica.....	48
4.2	Comparação dos resultados dos diferentes ensaios.....	50
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	52
5.1	Conclusões.....	52
5.2	Trabalhos futuros.....	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
	ANEXOS.....	59

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Unidades cristalinas básicas dos minerais aluminossilicatados .....	6
Figura 2.2 – Manilhas com BAA de 1500mm de diâmetro .....	7
Figura 2.3 – Travessas monobloco de caminho-de-ferro.....	8
Figura 2.4 – Blocos de pavê em BAA .....	8
Figura 2.5 – Barreiras pré-fabricadas para estradas em BAA.....	8
Figura 2.6 – Painéis para lajes em BAA .....	9
Figura 2.7 – Revestimentos de fachada.....	9
Figura 2.8 – Montagem de paredes com blocos reforçados em BAA.....	9
Figura 2.9 – Ensaio de edifício de dois pisos com elementos em BAA .....	10
Figura 2.10 – Variação da profundidade de carbonatação com o tempo e com A/C .....	17
Figura 2.11 – Influência de A/C na profundidade da carbonatação .....	17
Figura 2.12 – Influência da humidade no grau de carbonatação.....	17
Figura 2.13 – Gradiente de pH na frente de carbonatação.....	18
Figura 2.14 – Exemplo de diagrama esquemático para teste de carbonatação acelerada.....	19
Figura 3.1 – Cinzas volantes .....	23
Figura 3.2 – Amostras dos agregados.....	24
Figura 3.3 – Curvas granulométricas dos agregados .....	26
Figura 3.4 – Pintura dos provetes com os 3 tipos de tinta.....	26
Figura 3.5 – Tubos PVC para fabrico dos provetes cilíndricos.....	28
Figura 3.6 – Betonagem dos provetes.....	28
Figura 3.7 – Cura das amostras em tanque com condições de temperatura pretendidas .....	29
Figura 3.8 – Máquina de corte de disco adiamantado para obtenção de provetes .....	29
Figura 3.9 – Esquema do ensaio de absorção de água por capilaridade .....	30
Figura 3.10 – Corte diametral dos provetes ao fim de 72 horas.....	31
Figura 3.11 – Câmara de carbonatação acelerada FITOCLIMA 300.....	32
Figura 3.12 – Definição da profundidade de carbonatação.....	33
Figura 3.13 – Adaptação de um esquema para ensaio da resistividade elétrica.....	34
Figura 3.14 – Medição da resistividade elétrica de um dos provetes de BN aos 14 dias .....	35
Figura 4.1 – Resistência à compressão em função da idade .....	36
Figura 4.2 – Pormenores do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	37

---

Figura 4.3 – Curvas da absorção de água por capilaridade .....	39
Figura 4.4 – Curvas dos coeficientes de absorção capilar – BN .....	40
Figura 4.5 – Curvas dos coeficientes de absorção capilar – BAA1.....	40
Figura 4.6 – Curvas dos coeficientes de absorção capilar – BAA2.....	41
Figura 4.7 – Corte dos provetes com prensa hidráulica.....	42
Figura 4.8 – Pulverização do provete e leitura da profundidade de carbonatação .....	42
Figura 4.9 – Profundidade de carbonatação – 0 dias .....	43
Figura 4.10 – Profundidade de carbonatação – 14 dias .....	43
Figura 4.11 – Profundidade de carbonatação – 28 dias .....	44
Figura 4.12 – Profundidade de carbonatação – 56 dias .....	44
Figura 4.13 – Profundidade de carbonatação – 90 dias .....	45
Figura 4.14 – Profundidade de carbonatação em provetes com tinta – 28 dias .....	45
Figura 4.15 – Profundidade de carbonatação em provetes com tinta – 56 dias .....	46
Figura 4.16 – Profundidade de carbonatação em provetes com tinta – 90 dias .....	46
Figura 4.17 – Profundidade de carbonatação vs. tempo .....	47
Figura 4.18 – Profundidade de carbonatação vs. tempo dos provetes com tinta.....	47
Figura 4.19 – Profundidade de carbonatação vs. tempo .....	48
Figura 4.20 – Resistividade Elétrica – BN.....	49
Figura 4.21 – Resistividade Elétrica – BAA1 .....	49
Figura 4.22 – Resistividade Elétrica – BAA2 .....	49
Figura 4.23 – Variação da resistividade elétrica em função da idade.....	50



---

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Retrospectiva histórica dos cimentos alcalinos.....	4
Quadro 2.2 – Classes de Exposição Ambiental.....	15
Quadro 2.3 – Classes de Exposição Ambiental: Corrosão induzida por carbonatação .....	15
Quadro 3.1 – Composição química (%) e área de superfície das CV.....	23
Quadro 3.2 – Percentagens de passados dos agregados.....	25
Quadro 3.3 – Composição detalhada dos betões com cimento .....	27
Quadro 3.4 – Composição química detalhada dos BAA's.....	27
Quadro 3.5 – Parâmetros de exposição do ensaio relativos a cada norma.....	33
Quadro 4.1 – Resistividade à compressão para diferentes idades. ....	36
Quadro 4.2 – Medições da pesagem dos provetes, em gramas .....	38
Quadro 4.3 – Medições da altura de ascensão capilar da água, em milímetros .....	38
Quadro 4.4 – Valores do coeficiente de absorção de água por capilaridade, $S_a$ , em $\text{kg/m}^2$ ....	39
Quadro 4.5 – Leituras da frente de carbonatação .....	47
Quadro 4.6 – Leituras da frente de carbonatação com influência da tinta.....	47
Quadro 4.7 – Dimensões dos provetes.....	48
Quadro 4.8 – Resistividade elétrica para idades diferentes.....	49

---

## SIMBOLOGIA

A – ampere

A/C – relação água/cimento

Al – alumínio

$\text{AlO}_4$  – tetraedro de óxido de alumínio

Ba – bário

C – quantidade de dióxido de carbono na amostra

$\text{C}_{12}\text{A}_7$  – aluminato de cálcio não cristalizado

Ca – cálcio

$\text{CaCO}_3$  – carbonato de cálcio

CaO – óxido de cálcio

$\text{CO}_2$  – dióxido de carbono

CoV – coeficiente de variação

$D_c$  – percentagem do grau de carbonatação

$d_k$  – distância média entre a superfície do provete e a linha da frente de carbonatação

$d_k \text{ max}$  – distância máxima entre a superfície do provete e a linha da frente de carbonatação

$D_{\text{max}}$  – diâmetro máximo dos agregados

$d_{\text{min}}$  – diâmetro mínimo dos agregados

$\text{H}_2\text{O}$  – água

$\text{H}_3\text{O}$  – hidroxónio

I – intensidade de corrente (A);

K – potássio

$K_a$  – coeficiente de carbonatação em condições aceleradas

$K_n$  – coeficiente de carbonatação em condições naturais

KOH – hidróxido de potássio

L – comprimento do provete (m);

Li – lítio

M – ligante alcalino

$M_0$  – massa inicial

$M_i$  – Massa no instante i

n – grau de polimerização

Na – sódio

NaCl – cloreto de sódio

NaOH – hidróxido de sódio

$\text{NH}_4$  – amónio

---

$n\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$  – silicato de potássio  
 $n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$  – silicato de sódio  
Pcarb – profundidade de carbonatação  
pH – potencial de hidrogénio  
R – resistência elétrica absoluta medida no provete ( $\Omega$ );  
S – desvio Padrão  
Sa – coeficiente de absorção de água por capilaridade  
 $\text{SiO}_2$  – dióxido de silício  
 $\text{SiO}_4$  – tetraedro de óxido de silício  
St – Secção transversal do provete ( $\text{m}^2$ );  
 $t_a$  – tempo até se atingir uma profundidade de carbonatação  
 $t_i$  – tempo no instante i  
 $t_n$  – tempo até se atingir uma profundidade de carbonatação  
V – volt  
Vd – diferença de potencial (V);  
 $x_a$  – profundidade de carbonatação em condições de carbonatação acelerada  
 $x_n$  – profundidade de carbonatação em condições de carbonatação natural  
 $\rho$  – resistividade elétrica ( $\Omega\text{m}$ );  
 $\Omega$  – ohm

## ABREVIATURAS

AAA – argamassa ativada alcalinamente  
AAB – alkali-activated binders  
AAC – alkali-activated concrete  
AFS – areia fina siliciosa  
AMG – areia grossa granítica  
AMS – areia média siliciosa  
BAA – betão ativado alcalinamente  
BAA1 – mistura de betão ativado alcalinamente 1  
BAA2 – mistura de betão ativado alcalinamente 2  
BG – brita granítica  
BN – betão C30/37 com cimento Portland normal  
BN\_T1 – betão normal com tinta 1  
BN\_T2 – betão normal com tinta 2  
BN\_T3 – betão normal com tinta 3  
CP – cimento Portland  
CV – cinzas volantes  
EAF – escórias de alto forno  
LAA – ligantes ativados alcalinamente  
MSJC – Masory Standards Joint Committee  
PC – Portland cement  
PVC – policloreto de polivinila  
UHPC – ultra-high performance concrete

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Gerais e Enquadramento

A quantidade de estruturas degradadas no mundo é cada vez maior pelo que existe uma preocupação crescente no que diz respeito à durabilidade do betão. Aliado à durabilidade, a sustentabilidade da construção é também, atualmente uma prioridade por motivos ecológicos e económicos (Alexander, 2009). No que diz respeito ao sector da construção, o desenvolvimento de materiais eco-eficientes é um aspeto chave. Por exemplo, a produção de uma tonelada de cimento Portland (CP) é responsável pela emissão de aproximadamente uma tonelada de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), correspondendo a mais de 5% dos gases com efeito de estufa emitidos em todo o mundo (Duxson e Provis, 2008). Por esta razão, e pelo facto de o preço do Betão Ativado Alcalinamente (BAA) ser 10 a 30 % inferior ao do betão com CP (Chang, 2009), o uso de resíduos industriais torna-se uma alternativa bastante interessante, quer a nível ecológico, quer comercial

Os cimentos alcalinos têm como principais características a utilização de matéria-prima constituída principalmente por sílica e alumina (Hardjito e Rangan, 2005) que reagindo com um ativador alcalino permitem obter um material com propriedades mecânicas semelhantes ao betão com CP (Fernandez-Jimenez *et al*, 2009). A ativação alcalina de resíduos, ricos em sílica e alumina, teve início nos finais dos anos 1930, enquanto as primeiras aplicações estruturais remontam à época de 70. Nessa altura foram construídos coletores de drenagem e até elementos estruturais pré-fabricados para edifícios residenciais. Para além das boas propriedades mecânicas, o BAA apresenta parâmetros de durabilidade significativamente mais elevados do que os betões com CP, no que concerne à abrasão, ao ataque com ácidos, às reações álcalis sílica (Fernandez-Jimenez *et al*, 2007), permeabilidade à água (Olivia *et al*, 2008) e aos ciclos gelo-degelo (Dolezal *et al*, 2007), por isso, trata-se de uma solução interessante para o aumento da durabilidade das estruturas e consequente diminuição de custos referentes às operações de manutenção.

Os betões correntes têm evoluído bastante nos últimos anos, permitindo atingir valores elevados de resistência à compressão, e também um melhor comportamento face aos principais mecanismos de deterioração do betão armado, nomeadamente carbonatação e penetração de cloretos. Neste contexto surgem, os betões de elevado desempenho (UHPC), que são atualmente empregues em situações particulares, sobretudo em edifícios altos e em

estruturas localizadas em ambientes particularmente agressivos. Assim, estes betões podem ser considerados como uma evolução dos betões convencionais, mas com elevada durabilidade. Este betão adquire uma importância a nível mundial nos dias de hoje, pois tem como características a sua elevada resistência à compressão, durabilidade, e elevada resistência em idade iniciais (Camões, 2006).

## 1.2 Objetivos

Neste trabalho, pretende-se caracterizar o BAA quanto à sua resistência à carbonatação. Para isso serão comparados os desempenhos de duas misturas diferentes de BAA, uma mistura de referência produzida com CP e outra mistura de UHPC. Para a realização desta dissertação foram definidos os seguintes objetivos principais:

- avaliação da durabilidade de betões ativados alcalinamente;
- quantificação da influência de diferentes tipos de tintas comerciais na resistência à carbonatação do betão;
- comparação dos resultados obtidos entre os diferentes tipos de betão;
- análise da influência da composição dos betões na otimização da durabilidade;
- estabelecimento de correlação entre ensaios efetuados.

Com o intuito de atingir os objetivos acima especificados, adotaram-se vários ensaios experimentais de durabilidade: absorção de água por capilaridade; resistência à carbonatação; resistividade elétrica.

## 1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, nos quais são detalhados os seguintes conteúdos:

**Capítulo 1 - Introdução:** Faz-se o enquadramento e as considerações gerais. Faz-se também a definição dos objetivos a atingir e indica-se qual a organização adotada.

**Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica:** É realizada uma pesquisa bibliográfica e documental de artigos, teses e casos de estudo relativos ao BAA e referentes ao processo de carbonatação do betão.

**Capítulo 3 - Trabalho Experimental:** Descreve-se todo o trabalho experimental desenvolvido, abordando a descrição dos ensaios experimentais, incluindo parâmetros em estudo, características dos materiais, a constituição das misturas e procedimentos a adotar laboratorialmente.

**Capítulo 4 - Resultados e Análise:** Apresentam-se os resultados e é feita a sua análise.

**Capítulo 5 - Conclusões:** São apresentadas as principais conclusões retiradas do trabalho, bem como propostas a desenvolver em trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Betão Ativado Alcalinamente

#### 2.1.1 Retrospectiva Histórica

De investigações efetuadas anteriormente, verificou-se que os ligantes são já utilizados há pelo menos 9000 anos, pois foram descobertas argamassas (com elevadas quantidades de zeólitos, do tipo analcite, na sua constituição – quase 40%) em Jericó no vale do Rio Jordão e em Tel-Ramad na Síria, datadas de 7000 A.C. (Perinet *et al.*, 1980).

Costa (2012), refere que Davidovits, no ano de 1979, foi o primeiro investigador a analisar os ligantes utilizados nas grandes obras egípcias e romanas. Deste estudo, a conclusão obtida é que os ligantes eram compostos por aluminosilicatos cálcicos hidratados, sendo esta composição semelhante à do CP, e continha fases cristalinas do tipo analcite, uma rocha natural existente na crosta terrestre, explicando assim a durabilidade daqueles ligantes. Este mesmo autor chega a referir que os blocos aplicados na construção das pirâmides do Egito não são constituídos apenas por pedra calcária maciça, mas antes por um ligante, apresentando na sua constituição uma mistura de hidróxido de sódio (NaOH) e calcário (proveniente de Gizé), obtido através da mistura de cal, carbonato de sódio e água. “Durante o final da década de 1970, este investigador francês, registou patentes de ligantes obtidos através da ativação do metacaulino, inclusivamente da denominação “geopolímero” e foi responsável pelo grande desenvolvimento dos ligantes ativados alcalinamente (LAA)” (Costa, 2012).

De acordo com Davidovits, os “geopolímeros” são designados por polímeros devido a policondensarem, ganharem forma e endurecerem rapidamente à temperatura ambiente. Isto é, a partir da base etimológica da palavra, o termo “geo” indica a natureza inorgânica do material. No entanto, existem opiniões contraditórias em relação a este termo, visto que existem investigadores que consideram este um termo comercial, e que o mais correto a utilizar seria a designação “ligante ativado alcalinamente” ou “ligante obtido por ativação alcalina”.

O tipo de ligante utilizado, assim como o tipo de ativador e a sua dosagem fazem com que os produtos obtidos através de ativação alcalina tenham propriedades e características bastante diferentes. Deste modo, como a composição química é diferente em cada composto, os comportamentos mecânicos são diferentes nos produtos de reação gerados (Yang *et al*, 2007).

O início do estudo dos LAA data do ano de 1039, sendo a sua história sumarizada cronologicamente com os acontecimentos mais relevantes no Quadro 2.1 – Retrospectiva histórica dos cimentos alcalinos (Roy, 1999) (Roy, 1999).

Quadro 2.1 – Retrospectiva histórica dos cimentos alcalinos (Roy, 1999)

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Descrição</b>
Feret	1939	Cimentos com escórias
Purdon	1940	Combinações alcalis-escórias
Glukhovskiy	1959	Bases teóricas e desenvolvimento de cimentos alcalinos
Glukhovskiy	1965	Primeiros cimentos alcalinos
Davidovits	1979	Termo “ Geopolimero”
Malinowski	1979	Caracterização de aquedutos milenares
Forss	1983	Cimento tipo F (Escórias – alcalis – superplastificante
Langton e Roy	1984	Caracterização de materiais em edifícios milenares
Davidovits e Sawyer	1985	Patente do cimento “Pyrament”
Krivenko	1986	Sistemas $R_2O - RO - SiO_2 - H_2O$
Malolepsy e Petri	1986	Ativação de escórias sintéticas
Malek. <i>et al</i>	1986	Cimentos de escórias com resíduos radioativos
Davidovits	1987	Comparação entre betões correntes e betões milenares
Deja e Malolepsy	1989	Resistência ao ataque de cloretos
Kaushal <i>et al</i>	1989	Cura adiabática de ligantes alcalinos com resíduos nucleares
Roy e Langton	1989	Analogias dos betões milenares
Majundar <i>et al</i>	1989	Ativação de escórias – C12A7
Talling e Brandstetr	1989	Ativação alcalina de escórias
Wu <i>et al</i>	1990	Ativação de cimento de escórias
Roy <i>et al</i>	1991	Presença rápida de cimentos ativados alcalinamente
Roy e Silsbee	1992	Revisão sobre cimentos ativados alcalinamente
Palomo e Glasser	1992	Metacaulino com CBC
Roy e Malek	1993	Cimento de escórias
Glukhovskiy	1994	Betões milenares, modernos e futuros
Krivenko	1994	Cimentos alcalinos
Wang e Scrivener	1995	Microestrutura de escórias ativadas alcalinamente



### 2.1.2 Ativadores Alcalinos

De forma a obter os ligantes por ativação alcalina, os ativadores mais utilizados são uma associação de hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH), com silicato de sódio ( $n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$ ) ou de potássio ( $n\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$ ) (Granizo, 1998; Davidovits, 1999; Fernandez-Jimenez *et al*, 1999; Palomo *et al*, 1999).

Outros estudos (Duxon *et al*, 2007) apontam que a presença de silicatos na composição dos ativadores, aumenta a resistência final e a velocidade de endurecimento dos materiais fabricados.

De acordo com a sua composição química, os ativadores alcalinos podem ser classificados em seis grupos (Glukhovskiy *et al*, 1980):

- silicatos;
- álcalis cáusticos;
- sais ácido fracos não contendo silicato;
- sais ácido fortes não contendo silicato;
- aluminosilicatos;
- aluminatos.

### 2.1.3 Matéria-prima

Os ligantes ativados alcalinamente podem apresentar na sua constituição variadas matérias-primas, evidenciando na sua composição química aluminosilicatos. Desses aluminosilicatos podemos enumerar alguns, como por exemplo:

- metacaulino (Granizo *et al*, 2007);
- cinzas volantes (Palomo *et al*, 1999);
- mistura de cinzas e escórias (Buchwald *et al*, 2007);
- argilas caulínicas (Davidovits, 1994);
- escórias de alto-forno (Fernandez-Jimenez *et al*, 1999);
- mistura de cinzas e metacaulino (Swanepoel e Strydom, 2002);
- mistura de escórias e metacaulino (Cheng e Chiu, 2003);
- mistura de escórias e lamas vermelhas (Zhihua *et al*, 2003);
- mistura de cinzas e materiais não calcinados como caulinite e albite (Xu *et al*, 2002).

### 2.1.4 Composição Química

Segundo Lee e Deventer (2002), uma das diferenças entre as composições de CP e os LAA prende-se no facto de nos sistemas de CP com a utilização de água, com pH inicialmente neutro, se atingem valores de pH da ordem 12/13 à medida que a dissolução vai ocorrendo, os produtos resultantes são partículas não hidratadas e vários tipos de silicatos de cálcio

hidratados no estado cristalino. Pelo contrário, nos sistemas de LAA, de forma a desencadear o processo de dissolução, é necessária a junção de uma solução fortemente alcalina.

O mecanismo de reação das escórias é explicado através de três fases distintas:

- destruição das moléculas das escórias;
- formação de um precipitado de sílica e alumínio na superfície dos grãos de escórias;
- formação dos produtos de hidratação (Schnitzler, 2006).

O termo poli(sialatos) foi a designação química de geopolímeros sugerida por Davidovits (2005), em que o termo Sialato é uma abreviação de óxido aluminosilicatado.

Os sialatos formam uma rede que apresenta aniões tetraedros  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  e  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  e oxigénios nos vértices compartilhados (Figura 2.1).

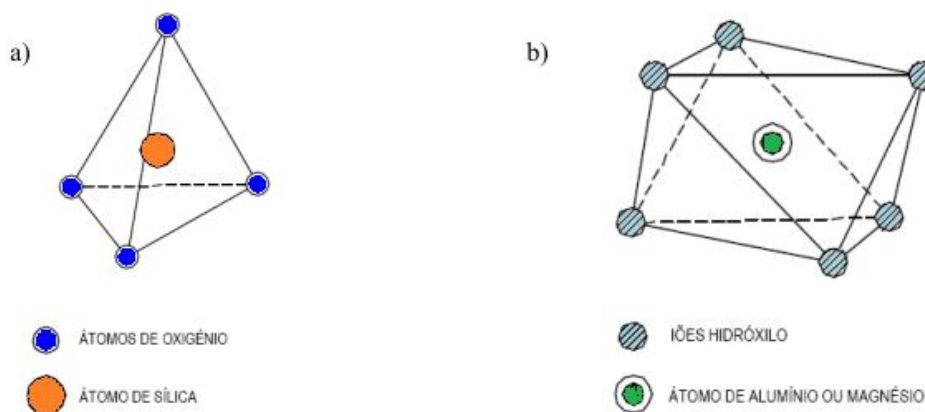


Figura 2.1 – Unidades cristalinas básicas dos minerais aluminosilicatados: a) tetraedro de sílica; b) octaedro de alumínio ou magnésio (Gomes, 1986; Deer *et al*, 2000)

Dado que é necessária a presença de íons positivos ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ba}^{++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ) na estrutura de forma a contrabalançar a diferença de carga elétrica do  $\text{Al}^{3+}$  em coordenação tetraédrica. Ou seja, após desidroxilação, o alumínio passa de coordenação 6 (octaédrica) para 4 (tetraédrica). Este processo de polimerização segue a seguinte equação descrita por Davidovits (1999):



Nesta fórmula empírica, “M” representa o ligante alcalino, n é o grau de polimerização e z é um número inteiro 1, 2 ou 3 que origina tipos de diferentes Poli(sialatos).

Na produção do CP, sabe-se que o fabrico de uma tonelada corresponde a cerca de uma tonelada de  $\text{CO}_2$  que é libertada para a atmosfera. Isto acontece pois há uma descarbonatação do calcário no forno, durante o fabrico do cimento.

### 2.1.5 Aplicações do BAA

Dos produtos feitos com o BAA estão incluídos blocos, painéis de parede, painéis de piso, painéis de telhado e lintéis. No entanto, só a partir de 1960 começaram a ser produzidos elementos estruturais em BAA. Por exemplo, na ex-União Soviética, como existia uma grande escassez de CP, proporcionou-se o desenvolvimento do betão estrutural, usando escórias de alto-forno (EAF) ativadas alcalinamente para construção de inúmeras estruturas, como por exemplo um edifício residencial de 15 pisos construído em 1960, um coletor de drenagem, construído em 1982 e travessas de caminho-de-ferro pré esforçadas, construídas em 1988 (Shi *et al*, 2006).

Os edifícios residenciais de grande altitude apenas se tornaram uma realidade entre 1896 e 1994. Entre estas datas, pode destacar-se um edifício de 24 pisos construído na cidade de Lipetsk, na Rússia. De acordo com Shi *et al* (2006) as paredes do edifício foram betonadas *in-situ*, sempre com utilização de um BAA com EAF, sendo as lajes e as escadas pré-fabricadas. Em 2000, o edifício foi inspecionado e verificou-se que ainda cumpria com os requisitos para os quais foi criado e apresentava uma resistência entre os 32 e os 37 MPa, bem superior à resistência que constava no projeto de 25 MPa.

Os produtos pré-fabricados são outra aplicação bastante utilizada com BAA. Para fabrico de redes de águas residuais, manilhas em BAA com cinzas volantes (CV) (Figura 2.2) aparentam ser uma boa solução.



Figura 2.2 – Manilhas com BAA de 1500mm de diâmetro (Gourley e Johnson, 2005)

Dado que estas redes se caracterizam por serem um meio muito agressivo, a elevada resistência ao ataque por soluções ácidas característica dos LAA torna-se especialmente indicada para este tipo de casos. No Congresso Mundial de Geopolímeros de 2005, empresas de pré-fabricados como a ROCLA anunciaram resultados experimentais acerca da execução dos pré-fabricados. Os produtos foram sujeitos a ensaios de carga definidos em regulamentos Australianos e ensaios de durabilidade simulando um ambiente agressivo. Os ensaios de carga

foram cumpridos e alguns passaram em larga escala. No que toca aos ensaios de durabilidade, as manilhas demonstraram um bom comportamento aos agentes agressivos.

Segundo Shi *et al*, (2006) outra aplicação possível para os BAA é o fabrico de travessas das linhas ferroviárias (Figura 2.3). A partir da década de 40, começaram a aparecer as travessas em betão pós-esforçado e dado que as madeiras de boa qualidade começaram a faltar e os betões tinham um desempenho superior, fez com que levasse à sua disseminação (Bastos, 1999).



Figura 2.3 – Travessas monobloco de caminho-de-ferro (Rostovskaya *et al*, 2007)

Rostovskaya *et al*, (2007) confirmaram a utilização de betões ativados alcalinamente no fabrico de travessas monobloco. Estas travessas foram utilizadas num pequeno troço de linha ferroviária e estiveram sujeitas ao serviço durante 30 anos sem apresentarem deterioração.

Outro exemplo de aplicações pré-fabricadas com BAA são os blocos de pavê (Figura 2.4), postes de iluminação, barreiras para estradas (Figura 2.5) e tampas para caixas de visita (Bilek, 2007; Dolezal *et al*, 2007)



Figura 2.4 – Blocos de pavê em BAA (Bilek, 2007)



Figura 2.5 – Barreiras pré-fabricadas para estradas em BAA (Dolezal *et al*, 2007)

Hoje em dia, existem várias opções de produtos com diversas utilidades no mercado para além das que foram referidas atrás. Desde painéis para lajes (Figura 2.6), revestimentos de fachada (Figura 2.7) ou blocos em BAA reforçados (Figura 2.8).



Figura 2.6 – Painéis para lajes em BAA (fabricados pela Hebel)



Figura 2.7 – Revestimentos de fachada (fabricados pela Hebel).



Figura 2.8 – Montagem de paredes com blocos reforçados em BAA (State University of New York, Stony Brook)

O desenvolvimento do BAA não ficou por aqui, tendo-se procurado melhorar ou criar normas específicas no seu uso para uma melhor e mais segura utilização deste material em projetos, como é o caso da Universidade de Texas que através de ensaios (Figura 2.9) e com base na pesquisa feita até à data procuram novas disposições para a especificação americana de alvenarias MSJC (Masory Standards Joint Committee).





Figura 2.9 – Ensaio de edifício de dois pisos com elementos em BAA (Universidade do Texas, Austin)

### 2.1.6 Durabilidade do BAA

No que diz respeito à durabilidade de argamassa e BAA com CV, muito pouca informação está disponível, tendo em conta que se trata de um material novo e ainda pouco estudado. Contudo, neste capítulo será feito um pequeno estado da arte acerca dos trabalhos já publicados no âmbito da durabilidade do AAC.

De acordo com diversos autores, o BAA apresenta boas propriedades mecânicas, nomeadamente a:

- permeabilidade à água e absorção (Olivia, *et al*, 2008);
- cloretos e corrosão das armaduras (Miranda *et al*, 2005; Dolezal *et al*, 2007; Adam 2009);
- reação álcali-sílica (Fernandez-Jimenez *et al*, 2007; Garcia-Lodeiro *et al*, 2007);
- altas temperaturas (Dolezal *et al*, 2007; Kong *et al*, 2007);
- ataque de ácidos e soluções agressivas (Palomo *et al*, 1999; Song *et al*, 2005; Wallah e Rangan 2006; Fernandez-Jimenez *et al*, 2007);
- ciclos gelo-degelo (Dolezal *et al*, 2007).

#### 2.1.6.1 Permeabilidade à água e absorção

Estes são dois dos principais parâmetros de controlo da qualidade da durabilidade do betão, pois estão relacionados com a maior ou menor facilidade com que os fluidos penetram no material.

Foi desenvolvido por Olivia *et al* (2008), um estudo focado nas propriedades de penetrabilidade à água do BAA com CV, tendo utilizado como ativador alcalino uma combinação de solução de hidróxido de sódio e silicato de sódio. Concluiu que o BAA possui baixa absorção de água, baixo volume de vazios permeáveis e baixo coeficiente de absorção. Estes autores referem que o BAA estudado, poderia ser classificado como um betão com

qualidade média no que diz respeito ao valor de permeabilidade à água e que, tal como acontece no betão corrente, uma baixa relação Água/Ligante (A/L) e uma boa graduação dos agregados são fatores importantes para atingir uma baixa permeabilidade à água no BAA.

Noutro estudo, foi comparado o coeficiente de absorção de água entre duas misturas diferentes de BAA, uma com CV e outra com EAF, com uma mistura de betão corrente com CP, tendo-se concluído que o BAA com CV apresenta um coeficiente de absorção de água inferior ao BAA com EAF e ao betão corrente (Adam, 2009).

#### **2.1.6.2 Carbonatação, cloretos e corrosão**

A corrosão de armaduras é um dos principais fatores que leva à diminuição da capacidade estrutural dos elementos de betão armado, e os dois principais mecanismos de deterioração são a carbonatação e a penetração de cloretos.

Adam (2009) comparou a profundidade de carbonatação de duas misturas de BAA, uma com cinzas volantes e outra com escórias de alto-forno, com uma mistura de betão corrente com CP, concluindo que o BAA à base de EAF apresenta uma profundidade de carbonatação superior ao betão com CP. Quanto ao BAA com cinzas, apesar de não ter sido possível medir a frente de carbonatação por esta não ser nítida, o autor refere que neste, a penetração foi praticamente nula.

De acordo com Dolezal *et al* (2007), que estudaram as propriedades do BAA com CV, sujeito a uma solução de cloretos de sódio (NaCl), durante longos períodos de tempo, não observaram qualquer alteração no aspeto dos provetes, tendo sido observado um aumento da resistência à compressão durante o período de medição (720 dias), e o aumento da massa dos provetes durante o primeiro ano (cerca de 3%) tornando-se estável após esse período. Referem ainda que o nível de penetração do ião cloreto no provete denota uma tendência decrescente, assim como a baixa concentração de cloretos observada nos provetes.

Já Miranda *et al* (2005), que analisaram a resistência à corrosão de misturas de argamassa ativada alcalinamente (AAA) com CV, concluíram que estas passavam as armaduras de aço tão rapidamente e efetivamente como as argamassas produzidas com CP.

#### **2.1.6.3 Reação álcali-sílica**

A reação álcali-sílica é um processo químico que envolve os óxidos alcalinos ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) e hidróxilos ( $\text{OH}^-$ ) geralmente derivados do alcali, libertado pelo cimento hidratado, que reage com os agregados cujo constituinte é a sílica reativa (Garcia-Lodeiro *et al*, 2007).

Fernandez-Jimenez *et al* (2007) desenvolveram um estudo focado nas reações álcali-sílica de AAA com CV e compararam com argamassas produzidas com CP, constatando que, para as mesmas condições de ensaio, as AAA não são tão propícias à ocorrência deste fenómeno.

Garcia-Lodeiro *et al* (2007) estudaram também a reação álcali-sílica de LAA à base de cinzas volantes, tendo concluído que estes estão menos suscetíveis de gerar expansão através da reação álcali-sílica do que os materiais com produzidos com CP.

#### **2.1.6.4 Altas temperaturas**

O betão tem um bom comportamento quando exposto a altas temperaturas, sendo capaz de suportar temperaturas elevadas durante um grande período de tempo, contudo essa exposição gera perda de resistência. Alguns estudos em materiais ativados alcalinamente com CV, sujeitos a altas temperaturas, comprovam que este possui um comportamento mais estável do que os materiais produzidos com CP (Dolezal *et al*, 2007; Kong *et al*, 2007).

Kong *et al* (2007) estudaram o efeito de altas temperaturas de pastas ligantes produzidas com cinzas volantes e metacaulino, ativadas por uma solução constituída por silicato de sódio e hidróxido de potássio. Concluíram que a resistência do material com cinzas volantes aumentou a resistência à compressão após a exposição a elevada temperatura (800 °C), já a do material com metacaulino diminuiu. Estes autores concluíram ainda que os ligantes com cinzas volantes têm uma grande quantidade de pequenos poros (microporos), que facilita a fuga da humidade quando aquecidos, já as misturas com metacaulino não possuem a mesma distribuição de poros, possuindo mesoporos na sua grande maioria.

Dolezal *et al* (2007) também estudaram o comportamento de argamassas e betões ativados alcalinamente com CV sujeitos a temperaturas entre 150 e 1100 °C, constatando que estes materiais começam a perder a sua resistência para temperaturas acima de 250 °C, mantendo-se praticamente constante para a temperatura de 1100 °C, resistência que passa a ser 40 % do valor obtido aos 28 dias sem exposição a altas temperaturas. Estes autores referem ainda que os valores de resistência obtidos para o BAA foram consideravelmente superiores aos obtidos para o betão com CP.

#### **2.1.6.5 Ataque de ácidos e agentes agressivos**

O uso de LAA com CV poderá ser uma alternativa interessante no desenvolvimento de um betão resistente aos ácidos, uma vez que este tem sido referido como um material resistente ao ataque de ácidos e agentes agressivos, quando comparado com ligantes à base de CP.

Fernández-Jiménez *et al* (2007) compararam o desempenho de argamassas com CV ativada alcalinamente, com argamassas de CP, sujeitas a ataque químicos através de diferentes agentes agressivos, nomeadamente água do mar, sulfatos e ácido clorídrico (pH = 1),



observando que, no geral, as AAA apresentam uma melhor performance. Estes autores referem que a estabilidade dos ligantes com cinzas volantes é maior em ambientes com ácidos altamente agressivos, uma vez que o produto principal formado da ativação alcalina das cinzas volantes é um zeólito precursor, um sódio aluminosilicato, que é mais ácido do que o gel de silicato de cálcio hidratado resultante da hidratação do CP. Estes autores referem também que o facto de não existir praticamente nenhum cálcio na composição dos LAA com CV, faz com os que sulfatos não afetem negativamente a resistência deste tipo de materiais.

Wallah e Rangan (2006) também estudaram algumas propriedades a longo prazo do BAA com CV, entre as quais a resistência quando sujeito a sulfatos e a ácidos. No estudo da resistência a sulfatos, os provetes foram imersos numa solução com 5% de sulfato de sódio durante vários períodos de tempo até um ano, não se verificando qualquer tipo de dano ou desgaste na superfície dos provetes após um ano, nem alterações significativas na massa e na resistência à compressão. No estudo da resistência aos ácidos, os provetes foram imersos em soluções com concentrações de ácido sulfúrico, 2, 1 e 0,5%, tendo-se verificado após um ano de exposição, uma perda de massa de cerca de 3%.

Song *et al* (2005) também investigaram a durabilidade de BAA com CV expostos a soluções com 10% de ácido durante 56 dias, concluindo que o BAA é altamente resistente ao ácido sulfúrico, tendo-se observado apenas 3% de perda de massa, e uma redução pequena (cerca de 20%) da capacidade de carga, mesmo após toda a secção ter sido neutralizada pelo ácido sulfúrico, denotando assim um comportamento significativamente melhor do BAA em relação ao betão produzido com CP, tendo este apresentado uma perda de massa de 41% após 28 dias de exposição na mesma solução de ácido sulfúrico.

#### **2.1.6.6 Ciclos gelo-degelo**

Apesar de, em Portugal, o risco de ocorrência do ciclo gelo-degelo ser praticamente nulo, esta é outra das características à qual os materiais ativados alcalinamente produzidos com CV possuem um bom comportamento, e que vale a pena referir. Dolezal *et al* (2007) estudaram ainda o comportamento de misturas de argamassa e betão com CV sujeitos a ciclos de gelo-degelo, tendo sido concluído que a massa dos provetes após os ciclos praticamente não variou, e que os provetes mantinham cerca de 70% da resistência à compressão inicial. Para estes autores, de acordo com os resultados obtidos, é óbvio que os materiais ativados alcalinamente produzidos com CV possuem uma excelente resistência aos ciclos gelo-degelo.

## 2.2 Resistência à carbonatação do betão

Até aos finais dos anos 80 e inícios dos anos 90, a única preocupação com o betão era a sua resistência à compressão. No entanto, com o aumento de projetos de grandes infraestruturas na Europa, a partir desta data o interesse começa a incidir na temática da durabilidade.

Pode considerar-se uma estrutura durável se, durante o seu tempo de vida, são conservados os requisitos de projeto em termos de funcionalidade, segurança e estética, sem custos de manutenção não previstos. Como tal, haverá necessidade de proceder a uma avaliação e classificação quanto ao grau de agressividade do ambiente e também conhecer os materiais e a estrutura, para deduzir a sua durabilidade e portanto do seu desempenho.

De acordo com Ferreira (2000), para se obter um betão de boa qualidade é importante considerar a capacidade do betão em satisfazer os requisitos mecânico e de durabilidade. Já o documento Duracrete (1999) afirma que, para além dos materiais constituintes e composição do betão, a execução dos elementos de betão armado, como a betonagem, a cura, ou mesmo a compactação estão relacionados e definem a qualidade do betão.

No que diz respeito ao ambiente, terá de ser definida qual a classificação quanto à severidade de exposição em relação à durabilidade do betão. A norma NP EN 206-1 (2007) faz uma abordagem acerca das ações químicas ou físicas a que o betão está sujeito e cujas ações não são consideradas no projeto. Assim é esta norma que define diversas classes de exposição. De forma a esclarecer a aplicação das classes de exposição ambiental, a norma NP EN 206-1 faz referência no anexo nacional à especificação elaborada pelo LNEC (E-464, 2007). Esta especificação estabelece valores máximos da relação água/cimento (A/C) e valores mínimos da dosagem de ligante que, uma vez cumpridos, permitem prognosticar que o tempo de vida (durante o qual o betão simples ou com armaduras, mantém as propriedades especificadas sem necessidade de reparações) de um betão será da ordem dos 50 ou dos 100 anos face às condições ambientais. Para uma correta definição das classes de exposição do betão a especificação LNEC E-464 apresenta classes de exposição para tipo de ambiente a que o betão armado poderá estar sujeito durante o seu tempo de vida útil (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Classes de Exposição Ambiental (LNEC E-464, 2007)

Tipo de Ambiente	Classes
Sem risco corrosão	X0
Corrosão induzida por carbonatação	XC1, XC2, XC3 e XC4
Corrosão induzida por cloretos não provenientes água mar	XD1, XD2 e XD3
Corrosão induzida por cloretos da água mar	XS1, XS2 e XS3
Ataque gelo-degelo	XF1e XF2
Ataque químico	XA1, XA2 e XA3

Para o caso particular da corrosão induzida por carbonatação a especificação LNEC E-464 (2007) faz a descrição do ambiente para cada uma das classes (Quadro 2.3).

Quadro 2.3 – Classes de Exposição Ambiental: Corrosão induzida por carbonatação (LNEC E-464, 2007)

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos
XC1	Seco ou permanentemente húmido	Betão armado no interior de edifícios ou estruturas, com exceção das áreas com humidade elevada. Betão armado permanentemente submerso em água não agressiva.
XC2	Húmido, raramente seco	Betão armado enterrado em solo não agressivo. Betão armado sujeito a longos períodos de contacto com água não agressiva.
XC3	Moderadamente húmido	Superfícies exteriores de betão armado protegidas da chuva transportada pelo vento. Betão armado no interior de estruturas com moderada ou elevada humidade do ar (v.g., cozinhas, casas de banho).
XC4	Ciclicamente húmido e seco	Betão armado exposto a ciclos de molhagem/secagem. Superfícies exteriores de betão armado expostas à chuva ou fora do âmbito da XC2

Para cada uma das classes são estabelecidos os valores mínimos de dosagem de cimento, da relação A/C, classe de resistência à compressão e da espessura de recobrimento.

### 2.2.1 Descrição

Tal como explicado anteriormente, o fenómeno “carbonatação do betão” pode colocar em causa a sua durabilidade. Basicamente, este fenómeno consiste numa transformação de hidróxidos em carbonatos através de reações químicas devido à penetração do ar atmosférico nos poros do betão ou através de fissuras. Na composição da atmosfera, um dos gases presente é o CO<sub>2</sub> (numa proporção de 0,03% em volume) que, em contato com o hidróxido de cálcio ou o hidróxido de magnésio, em meio húmido, reagem e dão origem aos carbonatos de cálcio ou aos carbonatos de magnésio respetivamente, como demonstra a seguinte equação (Coutinho, 1998):



O betão normalmente possui pH entre 12 e 13, situação que não favorece o desencadeamento de reações de corrosão nas armaduras, uma vez que se forma em torno das armaduras uma película passivante que protege a armadura da corrosão. A penetração do  $\text{CO}_2$  pelos poros do betão, em direção ao seu interior, quando alcança a armadura faz com que ocorra a despassivação do aço, torna-o vulnerável. Após a despassivação do aço, abre-se o caminho para os agentes nocivos desencadearem o processo de corrosão do betão. Esta diminuição de alcalinidade faz com o que o betão atinja níveis de pH na ordem dos 9 ou abaixo, ou seja, o betão passa para uma situação em que está totalmente carbonatado (Gonçalves e Salta, 1996). Os parâmetros que têm mais influência na resistência à carbonatação do betão são:

- a relação água/cimento;
- as condições de cura;
- adições minerais
- a humidade na superfície do betão;
- a resistência à compressão.

Dado que o aumento da relação A/C aumenta proporcionalmente a porosidade do betão, então vai diminuir a resistência à carbonatação. Soretz (1966), citado por Silva (1995), elaborou dois gráficos (Figura 2.10 e 2.11) onde é possível concluir qual a influência da relação A/C na profundidade de um betão corrente, independentemente da natureza da atmosfera a que está exposto.

Má execução da cura ou má compactação pode formar um aumento da porosidade e permeabilidade, o que leva a uma carbonatação mais rápida (Figueiredo, 2005). Já a introdução de pozolanas na mistura de betão, como CV e sílica de fumo, podem diminuir o volume de vazios do betão no estado endurecido e desta forma aumentar a sua resistência à carbonatação. Também a humidade relativa influencia a resistência à carbonatação do betão (Figura 2.12).

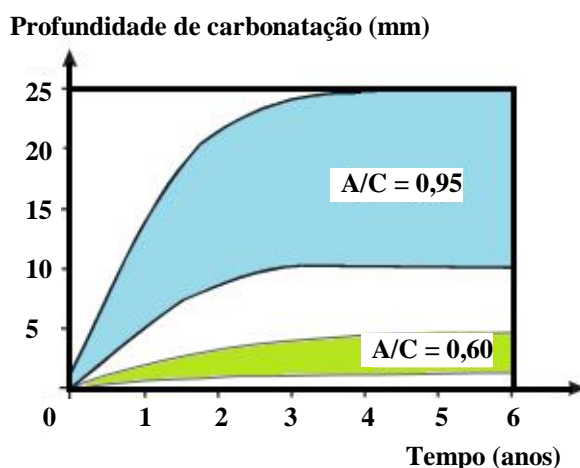


Figura 2.10 – Variação da profundidade de carbonatação com o tempo e com A/C (Soretz, 1966)

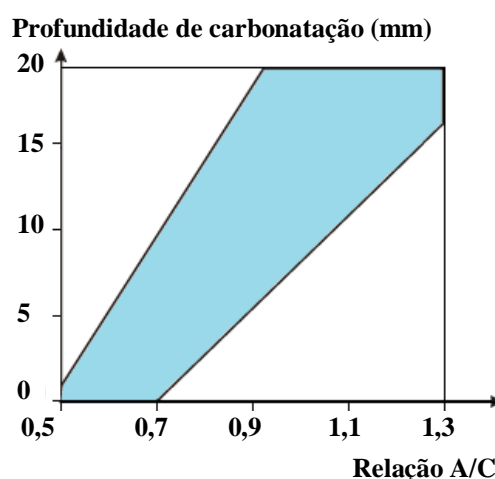


Figura 2.11 – Influência de A/C na profundidade da carbonatação (Soretz, 1966)

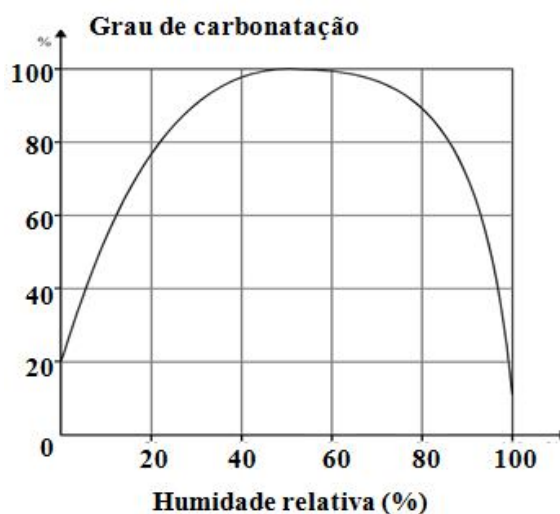


Figura 2.12 – Influência da humidade no grau de carbonatação (Coutinho, 2006)

A Figura 2.12 mostra como varia o grau de carbonatação com a humidade relativa do ar. Verifica-se que o grau atinge valores máximos para ambientes entre os 40 a 70% de humidade relativa.

A relação entre a resistência à compressão e carbonatação cinge-se simplesmente ao facto de quanto maior for a resistência, maior será a resistência à carbonatação (Parrott, 1990).

Quanto à leitura da profundidade de carbonatação, é recomendado que se faça o mais rápido possível, devido à coloração da fenolftaleína que atenua com o passar do tempo. Gonçalves e Salta (1996) através de um gráfico, fazem uma correspondência entre gradiente de pH e a distância à frente de carbonatação (Figura 2.13).

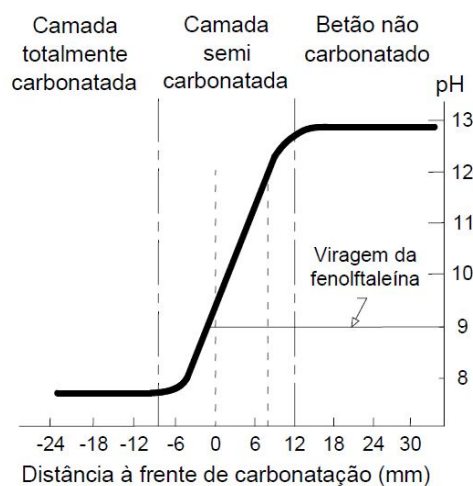


Figura 2.13 – Gradiente de pH na frente de carbonatação (Gonçalves e Salta, 1996)

### 2.2.2 Estudos e Normas

A avaliação do grau de penetração do betão pode ser feita de maneira simples, bastando para tal um comum indicador químico como por exemplo uma solução de fenolftaleína (Duracrete, 1999). Basicamente, este indicador é aplicado sobre a superfície cuja profundidade de carbonatação se pretende determinar. Para situações em que o pH é superior a cerca de 9.5 a superfície da amostra adquire tons rosa forte, ou seja, em superfícies carbonatadas não existe qualquer alteração de cor.

Existem ainda diferentes métodos para determinação da resistência à carbonatação, métodos acelerados e naturais. Os métodos acelerados consistem em aumentar a concentração de  $\text{CO}_2$  no ambiente envolvente às amostras, enquanto nos métodos naturais as amostras estão sujeitas às circunstâncias naturais do ambiente. Como referido atrás, ambos os métodos necessitam de uma solução de fenolftaleína para além de uma máquina de corte de provetes. No entanto, no método acelerado é necessário um equipamento (Figura 2.14) em que seja possível controlar o ambiente envolvente aos provetes, humidade relativa, temperatura e concentração de  $\text{CO}_2$  (Cengiz, 2003).

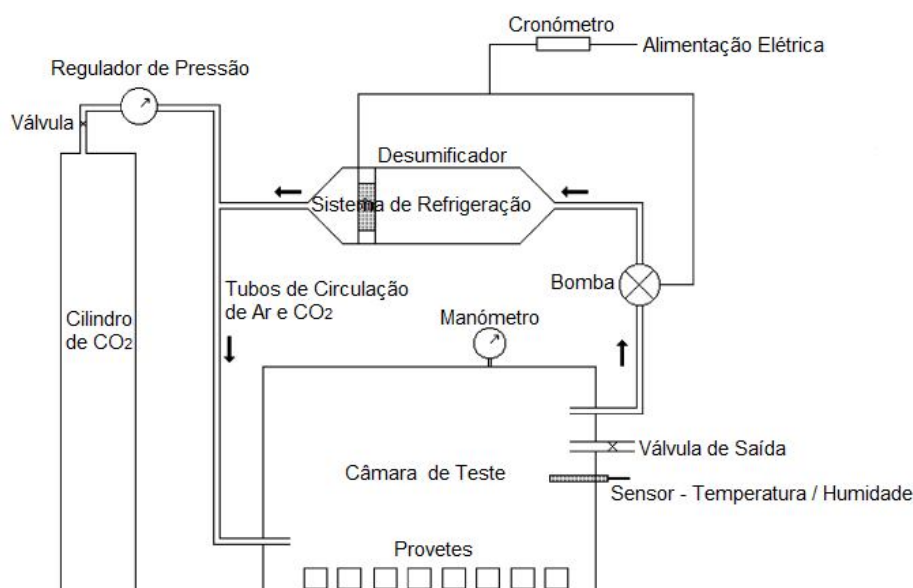


Figura 2.14 – Exemplo de diagrama esquemático para teste de carbonatação acelerada (Cengiz, 2003)

É ainda possível determinar a resistência à carbonatação fazendo uma avaliação de forma indireta através do método CEMBEREAU ou através do método TORRENT. O primeiro faz uma avaliação com recurso à medição da permeabilidade ao ar e é destrutivo, enquanto o segundo método determina o coeficiente de permeabilidade *in-situ* (Duracrete, 1999).

Para que a avaliação seja feita de forma criteriosa e parametrizada, existem diversas normas onde são explicados os procedimentos a elaborar, das quais se destacam: norma NT Build 357 (1989), a especificação portuguesa LNEC E 391 (1993) e norma espanhola UNE 83993-1 (2013). Estas normas são em tudo semelhantes, apenas diferindo no parâmetro de exposição relativo ao valor da concentração de CO<sub>2</sub> na câmara de teste, enquanto a especificação LNEC E 391 refere 5±0,1% como valor de referência para a concentração de CO<sub>2</sub>, a NT Build 357 menciona o valor de 3±0,1%.

O estudo dos investigadores Matsushita *et al* (2000) propunha como fórmula para determinar o grau de carbonatação do BAA a seguinte equação:  $D_c (\%) = (C - C_0) / C_{max} - C_0 * 100$ , onde C, C<sub>0</sub> e C<sub>max</sub> são a quantidade de dióxido de carbono na amostra, em amostras não carbonatadas e a quantidade de dióxido de carbono necessária para se combinar com o total de óxido de cálcio na amostra para formar o carbonato de cálcio, respetivamente. Segundo o autor, em comparação com outros métodos, foi possível constatar que este era mais preciso do que outros.

### 2.2.3 Modelos analíticos e numéricos

Sendo  $K_a$  o coeficiente de carbonatação em condições aceleradas e  $K_n$  o coeficiente de carbonatação em condições naturais. De acordo com Simas (2007), conhecendo estes valores  $K$  atrás referidos, é possível determinar o valor do quociente entre os dois e experimentalmente, num curto espaço de tempo, antever qual será o desempenho em ambiente natural.

Sendo assim, para cálculo da profundidade de carbonatação em condições aceleradas e em condições naturais, podem aplicar-se as seguintes equações (Equação 2.3 e 2.4) de maneira a realizar a modelação:

$$x_a = K_a \cdot \sqrt{t_a} \quad (2.3)$$

- $x_a$  - profundidade de carbonatação em condições de carbonatação acelerada (mm);
- $t_a$  - tempo até se atingir uma profundidade de carbonatação (horas);
- $K_a$  - coeficiente de carbonatação em condições aceleradas.

$$x_n = K_n \cdot \sqrt{t_n} \quad (2.4)$$

- $x_n$  - profundidade de carbonatação em condições de carbonatação natural (mm);
- $t_n$  - tempo até se atingir uma profundidade de carbonatação (horas);
- $K_n$  - coeficiente de carbonatação em condições naturais.

Determinados os coeficientes de carbonatação em condição acelerada e em condição natural através das equações 2.3 e 2.4, para uma mesma profundidade de carbonatação é possível indicar uma relação entre o tempo de duração do ensaio acelerado e a correspondente tempo em ambiente real, tal como demonstra a equação 2.5.

$$x_a = x_n \Rightarrow \frac{t_n}{t_a} = \left( \frac{K_a}{K_n} \right)^{1/0,5} \quad (2.5)$$

### 2.2.4 Mecanismos de proteção do betão

Atualmente, existem alguns produtos no mercado concebidos especificamente para o combate à carbonatação. Estes produtos são tintas e argamassas cimentícias modificadas com polímeros.

A aplicação destes materiais pode ter uma função preventiva, aumentando a durabilidade e a resistência a ambientes agressivos a que está sujeito o betão.



Segundo Rodrigues (1996), estes produtos apresentam constituintes de elevados coeficientes de resistência à penetração de  $\text{CO}_2$  e depois de estudos efetuados, demonstraram que realmente podem ter um efeito benéfico no que concerne à resistência à carbonatação dos betões. A aplicação destes produtos conduz a um acréscimo de custos, ou seja, é importante perceber até que ponto compensa a aplicação dos mesmos.

## 3 TRABALHO EXPERIMENTAL

### 3.1 Descrição dos Parâmetros em Estudo

No presente trabalho experimental analisaram-se 4 tipos de betão: um betão C30/37 com cimento Portland normal (BN), dois betões constituídos por diferentes misturas ativadas alcalinamente (BAA1 e o BAA2) e um betão de elevado desempenho (UHPC). O BAA1 e o BAA2 apresentam composições muito semelhantes, apenas variando no volume de cada constituinte e na presença do silicato de sódio no BAA2.

A definição dos ensaios mais adequados a realizar dependeu dos fatores tempo de ensaio, orçamento e duração da dissertação. As técnicas experimentais e os ensaios realizados foram a absorção de água por capilaridade, carbonatação acelerada e resistividade elétrica. De forma a completar o trabalho, fez-se uma análise acerca da influência da pintura na durabilidade do betão C30/37 com três tintas diferentes (BR\_T1, BR\_T2 e BR\_T3). Todos os trabalhos experimentais foram executados com base em referências normativas e especificações já existentes.

Os principais parâmetros em estudo que se pretendem avaliar são os seguintes:

- profundidade da carbonatação nos diferentes tipos de betão ao longo do tempo;
- a influência da pintura na progressão da frente de carbonatação ao longo do tempo;
- correlação entre os valores obtidos na absorção de água por capilaridade e os valores da carbonatação acelerada;
- correlação entre os valores obtidos na resistividade elétrica e os valores da carbonatação acelerada.

### 3.2 Caracterização dos Materiais

Este capítulo especifica quais os materiais utilizados na realização das misturas de betão e quais as suas respetivas propriedades.

#### 3.2.1 Ligante Base

Para execução das misturas de BAA1, é necessária a utilização de um material com características de um aluminossilicato. Assim, como ligante base, foram utilizadas cinzas

volantes. As CV (Figura 3.1) utilizadas têm uma massa volúmica de  $2,38 \text{ kg/m}^3$ . No Quadro 3.1 é apresentada detalhadamente composição química das CV utilizadas. As características das cinzas foram obtidas laboratorialmente (Ferreira, 2012)

Quadro 3.1 – Composição química (%) e área de superfície das CV (Ferreira, 2012)

Composição química									Área de Superfície [m <sup>2</sup> /g]
LI	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	
3,9	22,0	8,5	6,0	1,6	1,6	1,0	1,2	54,0	2,33



Figura 3.1 – Cinzas volantes

### 3.2.2 Ativador Alcalino

Tanto na primeira como na segunda mistura de BAA utilizou-se um ativador alcalino. Na primeira mistura (BAA1) apenas se utilizou como ativador alcalino o hidróxido de sódio, com concentração de  $12 \text{ mol/L}$ , enquanto na segunda mistura (BAA2), para além de hidróxido de sódio foi utilizado também silicato de sódio. Para produzir as soluções de hidróxido de sódio, foram utilizadas palhetas com grau de pureza 98%. A solução de silicato de sódio utilizada apresenta uma massa volúmica de  $1,4 \text{ kg/m}^3$ . Sempre que foi utilizado como ativador alcalino a combinação da solução de hidróxido de sódio com solução de silicato de sódio, estes foram pré-misturados com, pelo menos, 24 horas de antecedência.

### 3.2.3 Cimento Portland Normal

O cimento Portland utilizado para produzir os betões de referência, foi um cimento do Tipo I e Classe 52.5, em conformidade com as especificações da NP-2064 (1991).

### 3.2.4 Água

Foi utilizada água da rede pública de abastecimento da cidade de Coimbra. Esta água satisfaz as exigências da NP EN 206-1 (2007) e da especificação do LNEC E-372 (1993).

### 3.2.5 Agregados

Para execução das 4 misturas de betão são necessários agregados. Os agregados utilizados foram uma areia fina siliciosa 0/1 mm (AFS), uma areia média siliciosa 0/8 mm (AMS), uma areia média granítica 0/4 mm (AMG) e uma brita granítica 0/15 mm (BG). O aspeto visual dos mesmos encontra-se na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Amostras dos agregados

Com base na norma NP EN 933-1 (2000) foram feitas análises granulométricas dos agregados apresentados na Figura 3.2. No Quadro 3.2 são apresentados os resultados da análise usando as séries de peneiros europeus (série principal e séries 1 e 2), módulos de finura e diâmetros mínimos e máximos. As correspondentes curvas granulométricas são apresentadas na Figura 3.3.

Quadro 3.2 – Percentagens de passados dos agregados

Série nº	Depósito	AFS	AMS	AMG	BG
Principal - 0	0,0625	0,13	0,04	1,09	0,48
Principal - 1	0,125	0,99	0,23	2,33	0,48
Principal - 2	0,25	12,20	1,67	6,36	0,48
Principal - 3	0,5	73,01	14,47	20,95	0,48
Principal - 4	1	98,70	32,85	42,60	0,48
Principal - 5	2	100,00	48,65	69,50	0,48
Principal - 6	4	100,00	65,40	90,44	0,48
Série 1	5,6	100,00	78,81	97,66	3,97
Série 2	6,3	100,00	88,85	99,34	10,40
Principal - 7	8	100,00	99,07	100,00	19,92
Série 2	10	100,00	100,00	100,00	35,52
Série 1	11,2	100,00	100,00	100,00	46,62
Série 2	12,5	100,00	100,00	100,00	65,03
Série 2	14	100,00	100,00	100,00	84,87
Principal - 8	16	100,00	100,00	100,00	100,00
Série 2	20	100,00	100,00	100,00	100,00
Série 1	22,4	100,00	100,00	100,00	100,00
Principal - 9	31,5	100,00	100,00	100,00	100,00
<b>Módulo de Finura:</b>		2,15	4,38	4,67	7,77
<b>Dmax (mm):</b>		1,00	8,00	4,00	16,00
<b>dmin (mm):</b>		0,00	0,00	0,00	5,60

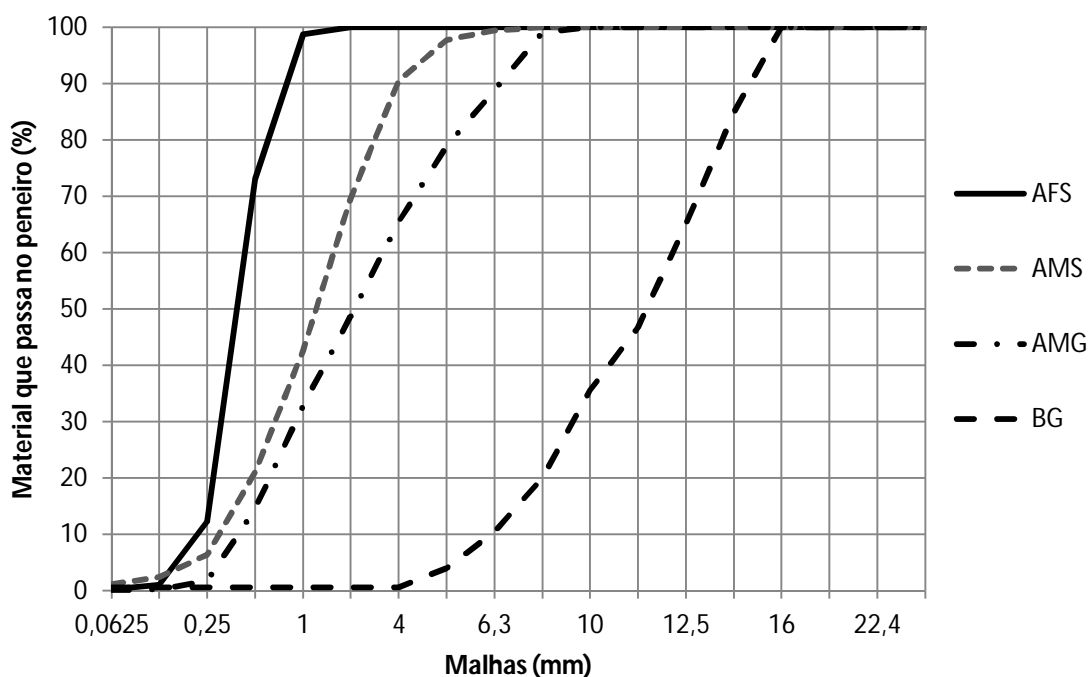


Figura 3.3 – Curvas granulométricas dos agregados

### 3.2.6 Tintas

Para a execução dos ensaios de carbonatação acelerada testou-se também a influência de 3 tintas com características e desempenhos diferentes (Figura 3.4). Uma tinta de revestimentos de proteção para betão (tinta 1), uma tinta acrílica para proteção de betão e rebocos (tinta 2) e uma tinta de verniz incolor para proteção do betão (tinta 3). As respectivas descrições e dados técnicos relativos a cada tinta encontram-se nos Anexos (Quadro A.1, A.2 e A.3).



Figura 3.4 – Pintura dos provetes com os 3 tipos de tinta

### 3.3 Constituição das misturas

Com o intuito de proceder à execução das misturas de betão para realizar os ensaios, foram elaboradas as constituições de cada mistura com os materiais atrás referidos. As dosagens de cada uma das misturas são apresentadas no Quadro 3.3 e no Quadro 3.4.

Quadro 3.3 – Composição detalhada dos betões com cimento

Constituintes	Volume aparente de betão (por m <sup>3</sup> )			
	BN		UHPC	
	Massas (kg)	Volumes (l)	Massas (kg)	Volumes (l)
Cimento 52.5	245,0	77,53	728,48	232,00
Sílica de fumo	---	---	173,60	80,00
Quartzo em pó	---	---	215,60	88,00
Filer	355,0	131,48	---	---
Adjuvantes	4,40	4,15	30,00	28,00
AFS	226,0	85,93	942,12	358,00
AMS	282,0	107,22	---	---
AMG	678,0	257,79	---	---
BG	423,0	160,84	---	---
Água	168,0	168,00	184,00	184,00
Ar	---	7	---	30,00
Total	2213,4	1000,0	1331,7	1000,0

Quadro 3.4 – Composição química detalhada dos BAA's

Constituintes	Volume aparente de betão (por m <sup>3</sup> )			
	BAA1		BAA2	
	Massas (kg)	Volumes (l)	Massas (kg)	Volumes (l)
Cinzas Volantes	500,0	210,08	500,0	210,08
Hidróxido de Sódio (12M)	250,0	187,97	110,0	82,71
Silicato de Sódio	---0	---	165,0	120,22
AMG	766,2	288,04	762,7	287,34
BG	742,0	278,96	746,6	280,67
Ar	---	20	---	20
Total	2298,0	1000,0	2283,2	1000,0

### 3.4 Produção e cura dos provetes

Para o fabrico dos provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro foram produzidas diversas cofragens com tubo PVC (policloreto de polivinila), que foi fixo a uma placa de madeira com silicone de forma a evitar perda de material (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Tubos PVC para fabrico dos provetes cilíndricos

O processo de fabrico de todas as misturas foi semelhante, consistindo nos seguintes passos: humedecimento da misturadora e adição dos materiais; mistura a seco dos constituintes; adição dos constituintes líquidos; amassadura durante 2 a 4 minutos; betonagem, incluindo vibração adequada. Na Figura 3.6 pode-se observar a parte final da betonagem de uma das misturas.



Figura 3.6 – Betonagem dos provetes

Após a betonagem, os provetes de BAA foram sujeitos todos às mesmas condições de cura, no forno, a uma temperatura de 90 °C durante 4 horas, enquanto os provetes de BN foram mantidos em condições de laboratório até à data do ensaio. Os provetes de BAA foram desmoldados após o período de cura, enquanto os provetes de BN foram desmoldados 24 horas após a betonagem. Os provetes foram todos colocados num tanque com água à temperatura 20°C ± 2°C (Figura 3.7) durante uma semana, altura em que se procedeu ao seu corte (Figura 3.8).





Figura 3.7 – Cura das amostras em tanque com condições de temperatura pretendidas



Figura 3.8 – Máquina de corte de disco adiamantado para obtenção de provetes

Após o corte dos provetes estes foram sujeitos às condições de cura previstas para cada um dos ensaios.

### 3.5 Descrição dos Métodos de Ensaio

Este capítulo descreve os testes necessários a efetuar de forma a atingir os objetivos. Para tal, são explicados os ensaios de resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, carbonatação e resistividade elétrica.

#### 3.5.1 Resistência à compressão

Para execução do ensaio de resistência à compressão segue-se a norma NP EN 12390-3 (2009). Todas as superfícies da máquina de ensaio devem estar limpas e qualquer material estranho deve ser removido. O provete deve estar centrado relativamente ao prato inferior com uma exatidão de 1% da dimensão do provete. De seguida, para execução do processo de aplicação de carga, apenas tem que se seleccionar uma velocidade constante de aplicação de carga. No ensaio experimental foram usados provetes cúbicos de cada betão estudado, com aresta de 10 centímetros.

#### 3.5.2 Absorção de Água por Capilaridade

Para execução da medição de absorção de água por capilaridade, optou-se por seguir o procedimento exposto na especificação LNEC E-393 (1993). Segundo a mesma, os provetes podem ter secção quadrada ou circular, uma altura de pelo menos o dobro da aresta ou do diâmetro e no mínimo devem ter um volume de  $0,001\text{m}^3$ . A cura dos provetes deve ser feita em água, a uma temperatura de  $20\pm 2$  °C, durante 28 dias. De acordo com os princípios atrás referidos, desenvolveram-se provetes para o ensaio com 0,2 m de altura, 0,1 m de aresta e consequentemente um volume de  $0,002\text{m}^3$ .

Para efetuar o ensaio, é necessário ter em atenção a preparação dos provetes. Depois da cura, limpam-se as superfícies dos provetes com um pano húmido, de maneira a retirar a humidade em excesso. Em seguida, colocam-se os provetes, durante 7 dias, numa estufa a uma temperatura de  $45\pm 3$  °C.

Com a preparação dos provetes efetuada, segue-se a realização do ensaio, para a execução do mesmo é necessário uma temperatura ambiente de  $20\pm 2$  °C e uma humidade relativa de  $65\pm 5\%$ . Os provetes devem ser colocados num tabuleiro com uma base de suporte que permita o contacto da face inferior com a água até uma altura de  $5\pm 1$  mm acima da base de cada provete, tal como exemplifica a Figura 3.9.

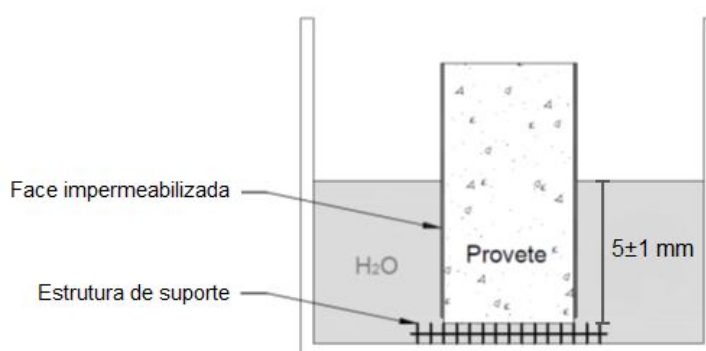


Figura 3.9 – Esquema do ensaio de absorção de água por capilaridade (LNEC E-393, 1993)

Quando se fazem as pesagens dos provetes, devem retirar-se os mesmos do tabuleiro e, numa superfície não absorvente, deixar a água escorrer durante  $60\pm 5$  segundos. No presente trabalho experimental, definiram-se pesagens às 0, 1, 3, 6, 24, 48 e 72 horas (sendo  $M_i$  a massa do provete no tempo  $t_i$ ) e medições de altura da água absorvida nas quatro faces ao fim de 1, 3, 6, 24, 48 e 72 horas. Durante o ensaio, deve ter-se especial cuidado em evitar molhar as outras faces dos provetes. Se necessário, estas devem ser impermeabilizadas. É também fundamental manter o nível da água constante, por isso, deve-se envolver o tabuleiro de forma a evitar a evaporação da água. No final, logo após as 72 horas, deve efetuar-se um ensaio de compressão diametral, de forma a confirmar a altura de água absorvida, tal como ilustra a Figura 3.10.

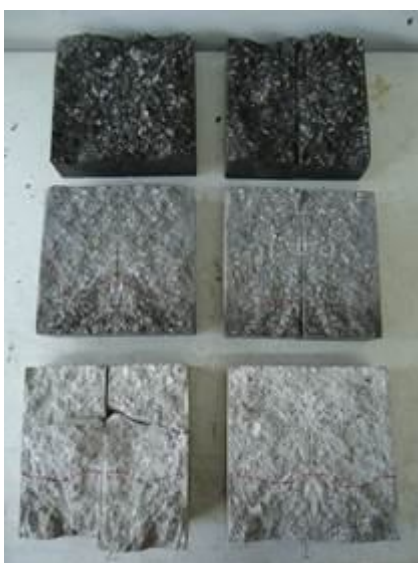


Figura 3.10 – Corte diametral dos provetes ao fim de 72 horas

O cálculo da absorção de água por capilaridade é feito dividindo, o aumento de massa ( $M_i - M_0$ ) pela área da face inferior de cada provete. Os resultados da absorção de água por capilaridade apresentam-se em  $\text{kg/m}^2$  para cada tempo  $\sqrt{t_i}$ . O coeficiente de absorção capilar é determinado através do declive da reta correspondente ao melhor ajuste de pontos obtidos da absorção capilar para cada tempo. Quando o betão não está sujeito a pressões hidrostáticas, mas apenas em contato com a água, o coeficiente expressa o desenvolvimento da absorção de água no betão (Coutinho, 1998).

Neste trabalho experimental foram ensaiados 3 tipos de betão, sendo 2 dos quais ativados alcalinamente (BAA1 e BAA2) e último com Cimento Portland Normal (BN)

### 3.5.3 Carbonatação

Para execução do ensaio de carbonatação acelerada existem diversas normas. No trabalho experimental foram seguidas a norma NT Build 357 (1989) e a especificação portuguesa LNEC E 391 (1993). A cura das amostras produzidas laboratorialmente é feita em água, a uma temperatura de  $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , durante 14 dias. Em seguida, são curadas ao ar, em condições de humidade relativa entre 45% a 55% e uma temperatura de  $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , até atingir os 28 dias.

O acesso do dióxido de carbono ao provete tem de ser única e exclusivamente pelas laterais da superfície por isso, de modo a que esta situação se verifique, é necessário proteger o topo dos provetes com um material isolante. Utilizou-se a tinta 1 para fazer a proteção dos topos. A resistência do betão à penetração do  $\text{CO}_2$  é determinada através de procedimentos que

englobam a exposição dos provetes a um ambiente enriquecido em  $\text{CO}_2$ . De forma a garantir a monitorização da concentração de  $\text{CO}_2$ , é necessário uma câmara de carbonatação (Figura 3.11), com uma exposição estável de 3% de  $\text{CO}_2$  no seu interior de forma a acelerar o efeito de carbonatação do betão ensaiado. Neste ponto, existe uma pequena incongruência entre a norma NT Build e a norma do LNEC, pois a primeira refere que a exposição ao  $\text{CO}_2$  deve ser de 3% enquanto a segunda refere que a exposição deve ser de  $5 \pm 0,1\%$ . Todavia, qualquer uma das percentagens de  $\text{CO}_2$  escolhidas para fazer a análise experimental está correta, pois de acordo com o artigo de Christoph Gehlen (1999) a quantidade crítica de  $\text{CO}_2$  necessária no ar para simular o processo de carbonatação acelerada começa entre 1% a 3%. No trabalho experimental foi seguida a norma NT Built 357.



Figura 3.11 – Câmara de carbonatação acelerada FITOCLIMA 300

Dado que a norma NT Build e a especificação do LNEC referem que as amostras se devem conservar em situação estável de temperatura ( $T$ ) com valores na ordem dos  $23 \pm 3^\circ\text{C}$  e humidade relativa (HR) entre 55% a 65%, o que quer dizer que a câmara usada deve possuir a capacidade de manter as amostras nestas condições.

Finalmente, para proceder a uma correta medição da profundidade de carbonatação, esta deve ser feita recorrendo a uma solução de alcoólica de fenolftaleína a 0,1%, de acordo com a recomendação RILEM CPC-18 (1984). Esta recomendação estabelece que, no caso de a frente de carbonatação se desenvolver paralelamente à superfície (Figura 3.12 1a), o resultado é encontrado pelo valor da distância entre a superfície e a linha da frente de carbonatação ( $d_k$ ). Se a frente de carbonatação não se desenvolver paralelamente à superfície ou apresentar zonas

de irregularidade (Figura 3.12 1b e 1c), deve ser medido o valor médio ( $d_k$ ) e o valor máximo ( $d_k \text{ max}$ ).

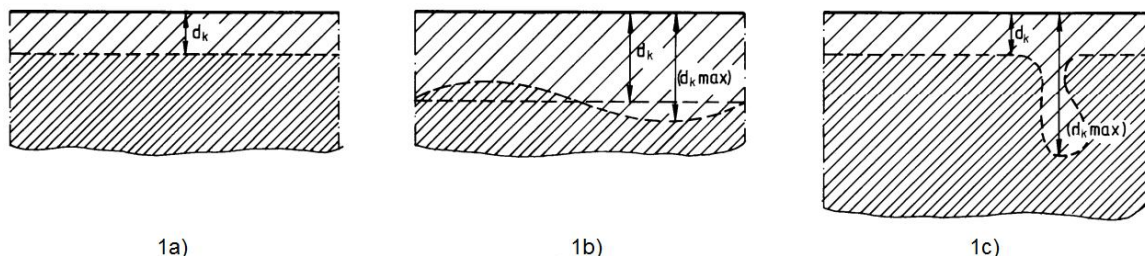


Figura 3.12 – Definição da profundidade de carbonatação (LNEC E-391, 1993)

As idades das leituras do desenvolvimento da carbonatação devem ser definidas dependendo do material, neste caso adotou-se a leitura para as idades 7, 14, 28, 56 e 90 dias. De acordo com a norma E 391-1993, o registo das profundidades de carbonatação e os parâmetros selecionados para ensaio devem ser expressos em concordância com o seguinte quadro:

Quadro 3.5 – Parâmetros de exposição do ensaio relativos a cada norma

Normas	Humidade relativa (HR)	Temperatura (T)	Concentração de $\text{CO}_2$ ( $\text{CO}_2$ )
LNEC E 391	55 a 65 %	$23 \pm 3$ °C	$5 \pm 0,1$ %
NT Build 357	55 a 65 %	---	$3 \pm 0,1$ %

#### 3.5.4 Resistividade Elétrica

Para execução do ensaio experimental de resistividade elétrica, seguiu-se a norma espanhola UNE 83988-1 (2006) e a Duracrete (1999). Este ensaio permite determinar a resistência elétrica de betões. A resistividade elétrica de um betão saturado de água é uma medida indireta da conectividade e tamanho dos poros, enquanto num betão insaturado é uma indicação de grau de saturação. Para determinação da resistividade do betão, apenas tem que se induzir a passagem de corrente entre os dois elétrodos e medir a voltagem. A norma refere como valor de referência uma circulação de corrente elétrica ente 30 a 50 mA. No ensaio utilizou-se uma corrente elétrica com uma medição de 40 mA. Deste modo, para executar o procedimento são necessárias duas esponjas com espessura inferior a 5 mm, duas placas de aço inoxidável com a abertura das malhas inferior a 2 mm, uma massa de 2kg e uma fonte de alimentação que permita aplicar corrente e ler a voltagem tal como o esquema da Figura 3.13.

É necessário ter especial cuidado com as condições de cura. Segundo a norma espanhola (UNE 83988-1), os provetes devem estar submergidos em água durante 28 dias e a água deve estar à temperatura de  $20 \pm 2$  °C. Durante o ensaio, os provetes devem estar completamente saturados de água, a temperatura ambiente deve ser de  $20 \pm 2$  °C, a humidade relativa não deve

ser inferior a 45%, as esponjas devem ser humedecidas com água e a medida da resistência elétrica deve ser retirada após a mesma estar estabilizada.

É também imprescindível fazer a medição da resistividade elétrica sem o provete, apenas com as esponjas, pois o valor da resistência elétrica absoluta de cada provete é o valor da subtração do conjunto esponjas, elétrodos, massa de 2kg e provete de betão pelo conjunto esponjas, elétrodos e massa de 2kg. A resistência das esponjas não deverá exceder os 100  $\Omega$  e um condutor que tenha uma resistência elétrica de 1  $\Omega$ , causará uma queda de tensão de 1 volt a cada 1 ampere de corrente que passar por ele.

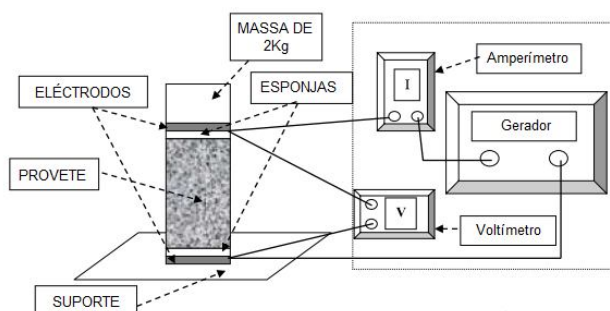


Figura 3.13 – Adaptação de um esquema para ensaio da resistividade elétrica (UNE 83988-1 2006)

De acordo com a Duracrete (1999), os provetes devem ter forma cilíndrica com 100mm de diâmetro e 200 a 300mm de altura e o cálculo da resistividade elétrica deve ser feito a partir da seguinte equação:

$$\rho = R \cdot \frac{St}{L} = \frac{Vd \cdot St}{L \cdot I} \quad (3.1)$$

- $\rho$  - resistividade elétrica ( $\Omega\text{m}$ );
- $R$  - resistência elétrica absoluta medida no provete ( $\Omega$ );
- $St$  - secção transversal do provete ( $\text{m}^2$ );
- $L$  - comprimento do provete (m);
- $Vd$  - diferença de potencial (V);
- $I$  - intensidade de corrente (A);

Dado que este ensaio serve também para fazer uma correlação com os valores obtidos no ensaio de carbonatação, optou-se por fazer leituras para as idades 14, 28, 56 e 90 dias. Na Figura 3.14 é apresentado o ensaio realizado aos 14 dias de um dos provetes de betão com CP.





Figura 3.14 – Medição da resistividade elétrica de um dos provetes de BN aos 14 dias

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE

### 4.1 Apresentação e análise dos resultados

#### 4.1.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado segundo o método de ensaio descrito no ponto 3.5.1. No Quadro 4.1 apresentam-se os valores médios de resistência à compressão relativos ao BN, BAA1, BAA2 e ao UHPC para as diferentes idades. Na Figura 4.1, são apresentados os valores apenas para o BN, o BAA1 e o BAA2.

Quadro 4.1 – Resistividade à compressão para diferentes idades.

Resistência à compressão (MPa)				
Idade	BN	BAA1	BAA2	UHPC
7	38,8	23,3	44,8	105,0
28	44,7	24,2	46,8	137,0
42	48,6	26,4	46,0	---
56	51,1	25,4	47,2	---
84	52,1	28,9	52,0	---
118	54,2	29,7	52,9	---

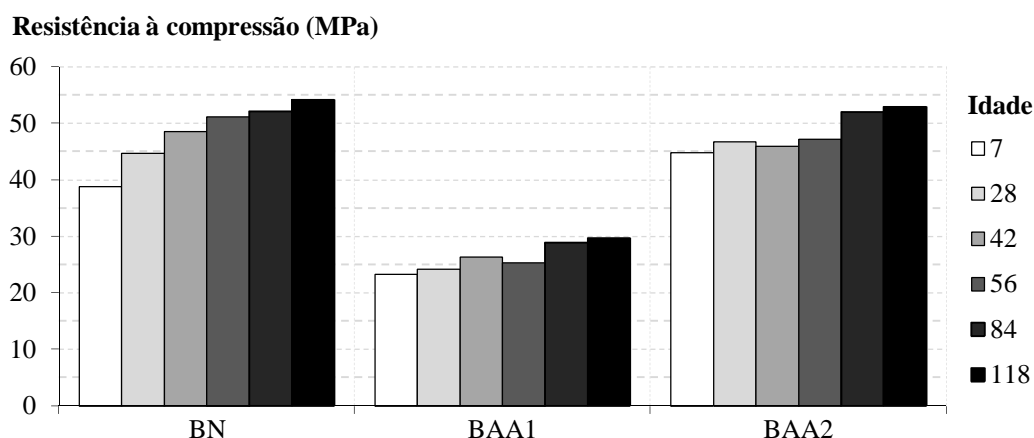


Figura 4.1 – Resistência à compressão em função da idade



Analisando os valores da resistência à compressão do Quadro 4.1 verifica-se que os valores do BN e do BAA2 são idênticos a partir dos 28 dias, enquanto o BAA1 apresenta valores cerca de 50% mais baixos. O valor mais baixo da resistência à compressão era expectável, devido ao ativador alcalino ser constituído apenas por hidróxido de sódio. Verifica-se ainda que o valor da resistência à compressão do UHPC é muito superior a todas as outras, cerca de 137 MPa aos 28 dias de idade.

Analisando a evolução da resistência à compressão das misturas de BN, BAA1 e BAA2, verifica-se que, nas misturas de BAA, a resistência à compressão entre 7 e 90 dias aumenta em média cerca de 23%, enquanto para a mistura de BN a resistência aumenta cerca de 37%.

#### 4.1.2 Absorção de Água Por Capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado segundo o método de ensaio descrito no ponto 3.5.2. No procedimento experimental foram ensaiadas 3 misturas (BN, BAA1 e BAA2) e optou-se por testar dois provetes para cada mistura.

Na Figura 4.2 apresentam-se imagens da fase de pesagem e da fase de medição da altura de ascensão capilar do procedimento realizado.

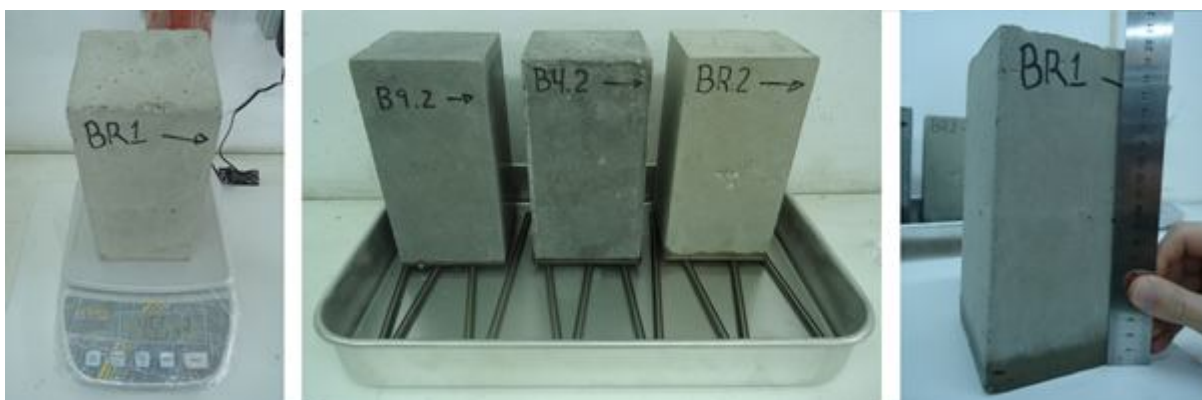


Figura 4.2 – Pormenores do ensaio de absorção de água por capilaridade

Os resultados das medições de pesagem e altura de ascensão capilar encontram-se no Quadro 4.2 e no Quadro 4.3 respetivamente.

Quadro 4.2 – Medições da pesagem dos provetes, em gramas

Mistura	Provete	0h	1h	3h	6h	24h	48h	72h
BN	BN.1	4555,7	4566,3	4573,1	4579,6	4598,8	4612,1	4620,1
	BN.2	4618,4	4631,4	4639,5	4646,2	4666,3	4679,1	4686,7
BAA1	BAA1.1	4351,0	4399,0	4431,3	4460,5	4560,2	4618,1	4620,6
	BAA1.2	4342,9	4388,9	4413,9	4438,2	4516,0	4584,9	4605,2
BAA2	BAA2.1	4220,9	4235,1	4241,5	4249,3	4274,9	4299,7	4316,3
	BAA2.2	4310,7	4325,9	4332,5	4338,9	4365,3	4388,4	4405,5

Quadro 4.3 – Medições da altura de ascensão capilar da água, em milímetros

Mistura	Provete	Face	1h	3h	6h	24h	48h	72h	Corte Diametral
BN	BN.1	1	1,7	1,8	3,1	5,1	6,8	---	6,8
		2	1,2	1,4	2,0	5,1	7,0	---	
		3	1,6	1,7	2,0	5,0	6,7	---	
		4	1,6	1,8	2,5	5,2	6,7	---	
	BN.2	1	1,7	1,8	3,5	6,1	7,9	8,85	7,6
		2	1,7	1,9	3,0	5,8	7,6	---	
		3	1,3	1,7	2,9	5,5	7,3	8,3	
		4	1,5	2,0	2,9	5,9	7,6	---	
BAA1	BAA1.1	1	4,3	6,6	9,2	17,7	20,0	20,0	20
		2	4,6	6,8	9,5	18,4	20,0	20,0	
		3	3,9	6,5	9,4	18,4	20,0	20,0	
		4	4,1	6,5	8,9	18,0	20,0	20,0	
	BAA1.2	1	4,0	6,3	8,5	16,0	20,0	20,0	20
		2	4,3	6,4	8,6	15,5	20,0	20,0	
		3	3,6	5,8	8,3	15,3	20,0	20,0	
		4	4,1	6,2	8,6	15,2	20,0	20,0	
BAA2	BAA2.1	1	1,1	1,1	1,8	2,9	4,6	---	6,1
		2	1,2	1,8	2,2	5,6	5,9	7,0	
		3	1,8	1,9	2,6	4,5	5,1	6,7	
		4	1,5	1,8	2,1	4,0	5,2	6,2	
	BAA2.2	1	1,0	1,1	2,3	4,0	5,9	---	7
		2	1,4	1,8	2,2	4,5	6,4	7,9	
		3	1,8	2,2	3,0	4,9	6,5	7,9	
		4	1,4	1,7	2,2	4,2	6,0	7,0	

No que diz respeito à medição da altura de ascensão capilar da água, é possível verificar que no BAA1 a ascensão é muito mais acelerada que nos outros betões, chegando mesmo a atingir o topo do provete às 48h. No ensaio experimental, na medição das 72 horas foi impossível

obter alguns valores devido à linha de altura de ascensão capilar ser muito pouco perceptível. Contudo, através do corte diametral do provete foi possível chegar a um valor.

No Quadro 4.4 é apresentado o cálculo do coeficiente de absorção de água por capilaridade ( $S_a$ ). Através da análise do quadro pode constatar-se que o BAA1 tem uma absorção de água por capilaridade bastante superior à do BN e à do BAA2. Em relação aos outros dois betões, pode dizer-se que o BN e o BAA2 têm um comportamento semelhante até às 24h, no entanto o BN a partir das 48h estabiliza, enquanto o BAA2 continua a aumentar o valor da absorção de água por capilaridade.

Quadro 4.4 – Valores do coeficiente de absorção de água por capilaridade,  $S_a$ , em  $\text{kg/m}^2$

Mistura	Provete	1h	3h	6h	24h	48h	72h
BN	BN.1	1,1	1,7	2,4	4,3	5,6	6,4
	BN.2	1,3	2,1	2,8	4,8	6,1	6,8
BAA1	BAA1.1	4,8	8,0	11,0	20,9	26,7	27,0
	BAA1.2	4,6	7,1	9,5	17,3	24,2	26,2
BAA2	BAA2.1	1,4	2,1	2,8	5,4	7,9	9,5
	BAA2.2	1,5	2,2	2,8	5,5	7,8	9,5

Os resultados da absorção de água por capilaridade apresentam-se em  $\text{kg/m}^2$  para cada tempo  $\sqrt{t_i}$ . Na Figura 4.3 são demonstrados os resultados.

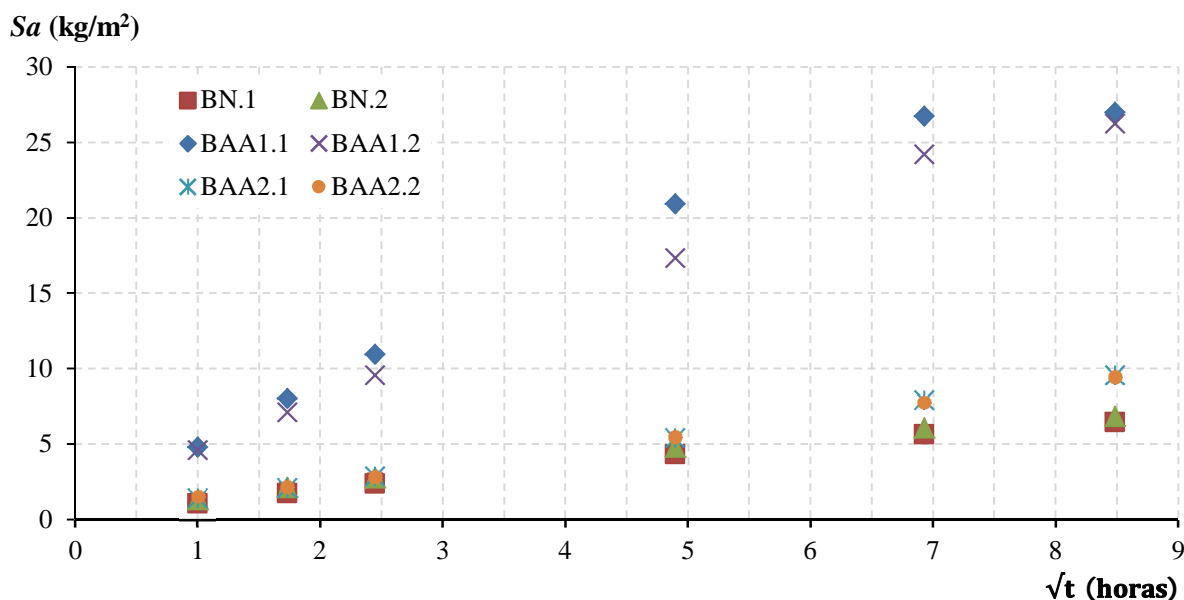


Figura 4.3 – Curvas da absorção de água por capilaridade

Através do declive da reta correspondente ao melhor ajuste de pontos obtidos da absorção capilar para cada tempo, é possível determinar o coeficiente de absorção capilar (Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6).

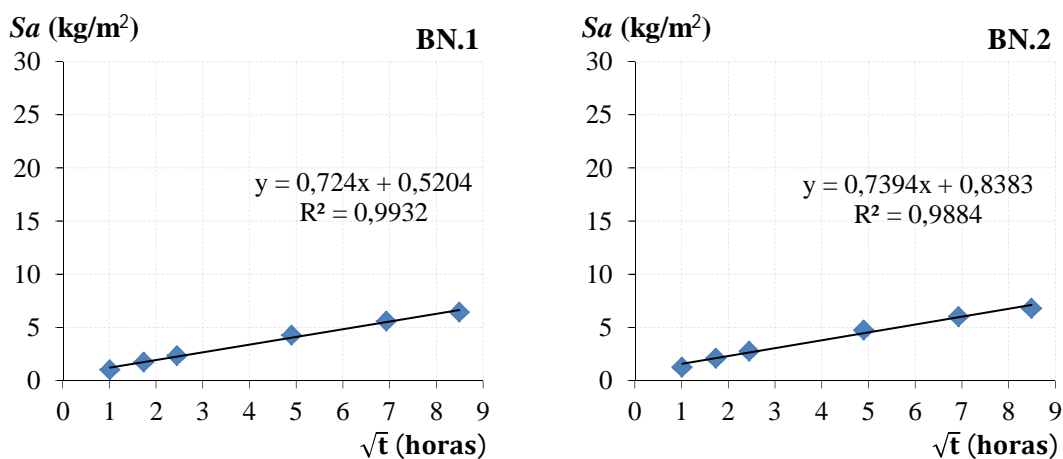


Figura 4.4 – Curvas dos coeficientes de absorção capilar – BN

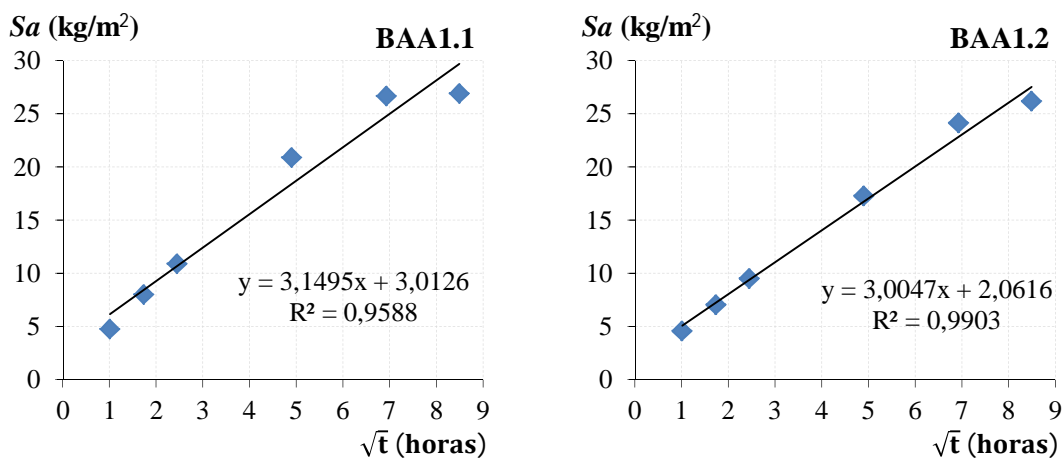


Figura 4.5 – Curvas dos coeficientes de absorção capilar – BAA1

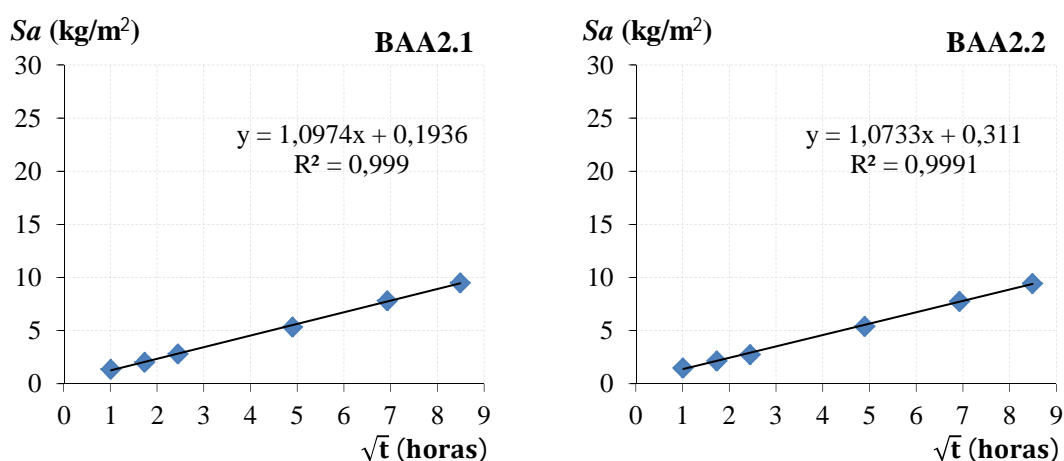


Figura 4.6 – Curvas dos coeficientes de absorção capilar – BAA2

Fazendo uma análise às Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, constata-se que o BAA1 é o que apresenta maior valor de coeficiente de absorção capilar (uma média de 3.1), este facto deve-se à maior porosidade do betão, enquanto os betões BN e BAA2 apresentam um coeficiente de absorção capilar mais baixo com valores entre 0,72 e 1.07. De referir também que todos os betões apresentam um bom coeficiente de correlação de resultados, aproximadamente 1.

#### 4.1.3 Carbonatação Acelerada

Nos ensaios de carbonatação acelerada foram testados 2 provetes para cada betão tipo, BN, BAA1, BAA2 e UHPC. Também se realizaram ensaios para verificar a influência de 3 tintas diferentes no BN. Procurou-se fazer uma calendarização das medições associada ao desenrolar da tese, por isso, as leituras do desenvolvimento da carbonatação foram medidas criteriosamente nas idades 7, 14, 28, 56 e 90 dias após a colocação dos provetes na câmara. No entanto, optou-se apenas por fazer as medidas nas idades 28, 56 e 90 para testar a influência da tinta, pois a profundidade de carbonatação nos primeiros dias após a pintura dos provetes é quase nula, sendo mais notória a médio e a longo prazo.

Para fazer a medição das amostras, é necessário fazer um corte transversal dos provetes, tentando obter uma superfície regular de forma a facilitar o ato de leitura da profundidade do  $\text{CO}_2$ . Para fazer o corte, utilizou-se uma prensa hidráulica, como demonstra a Figura 4.7. Uma das vantagens ao se efetuar o corte é obter 4 leituras num único provete.



Figura 4.7 – Corte dos provetes com prensa hidráulica

O passo seguinte, logo após o corte dos provetes, foi proceder à leitura da profundidade de carbonatação, pulverizando a solução de fenolftaleína e medindo os valores com recurso a um paquímetro digital, tal como exemplifica a Figura 4.8.



Figura 4.8 – Pulverização do provete e leitura da profundidade de carbonatação

De forma a uma mais fácil e interpretação dos resultados é necessário determinar o valor do coeficiente de carbonatação, portanto seguiu-se a modelação explicada no ponto 2.2.3. A equação 2.3 simula os efeitos da carbonatação no betão.

De acordo com a Figura 4.9, é possível observar a frente de carbonatação em cada um dos provetes aos zero dias após cura. Como seria de esperar, ainda nenhum provete apresenta penetração da carbonatação. Os provetes relativos aos dias 14, 28, 56 e 90 após a cura encontram-se nas Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13. Optou-se apenas por seleccionar um provete de cada betão relativo a cada idade.



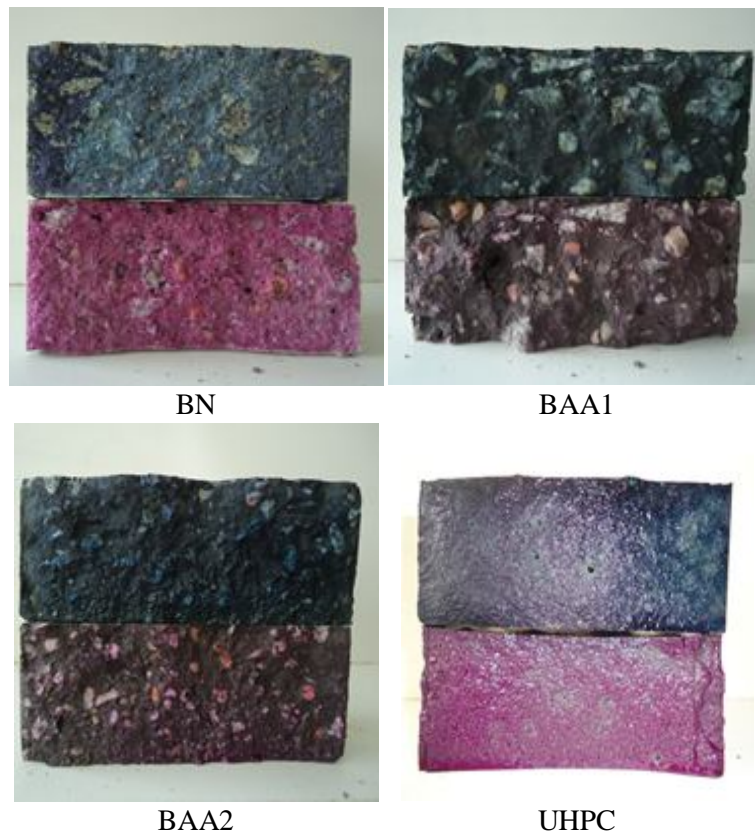


Figura 4.9 – Profundidade de carbonatação – 0 dias

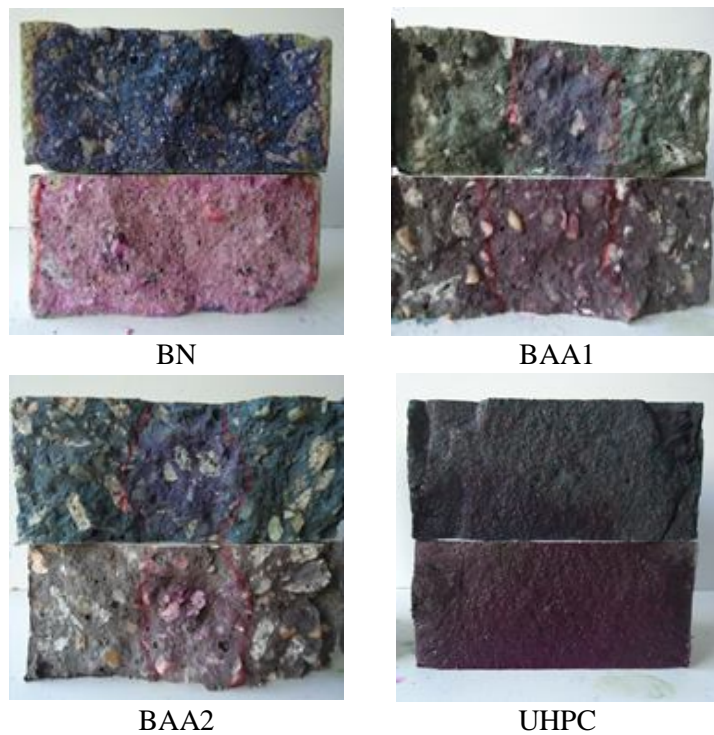


Figura 4.10 – Profundidade de carbonatação – 14 dias

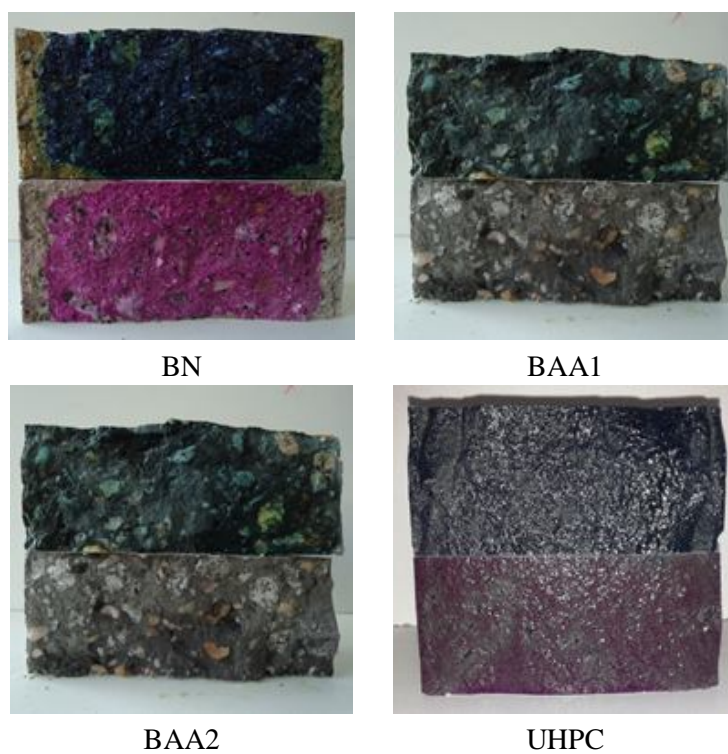


Figura 4.11 – Profundidade de carbonatação – 28 dias

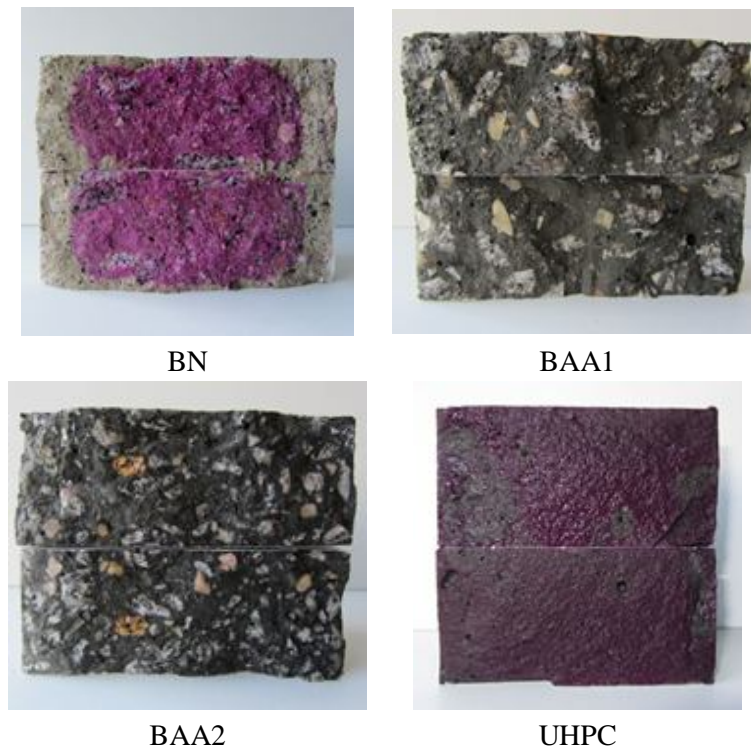


Figura 4.12 – Profundidade de carbonatação – 56 dias



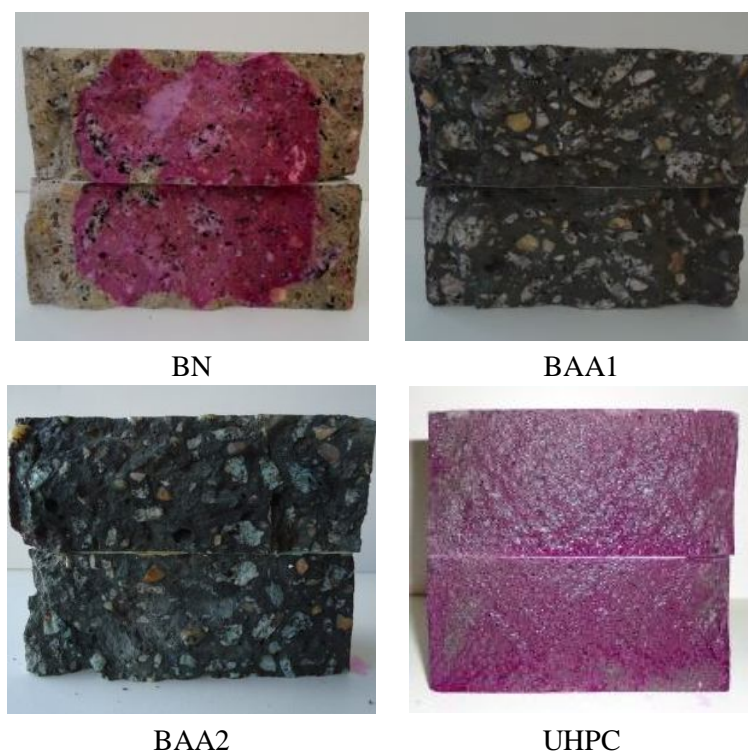


Figura 4.13 – Profundidade de carbonatação – 90 dias

De forma a conhecer a influência das tintas, também se procedeu ao teste dos provetes com pintura. Nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 encontram-se os detalhes dos provetes relativos aos 28, 56 e 90 dias respetivamente. Tal como anteriormente, optou-se apenas por selecionar um provete de cada betão relativo a cada idade. Na legenda de cada figura, após a designação do betão, indica-se o número da tinta correspondente que foi usada.

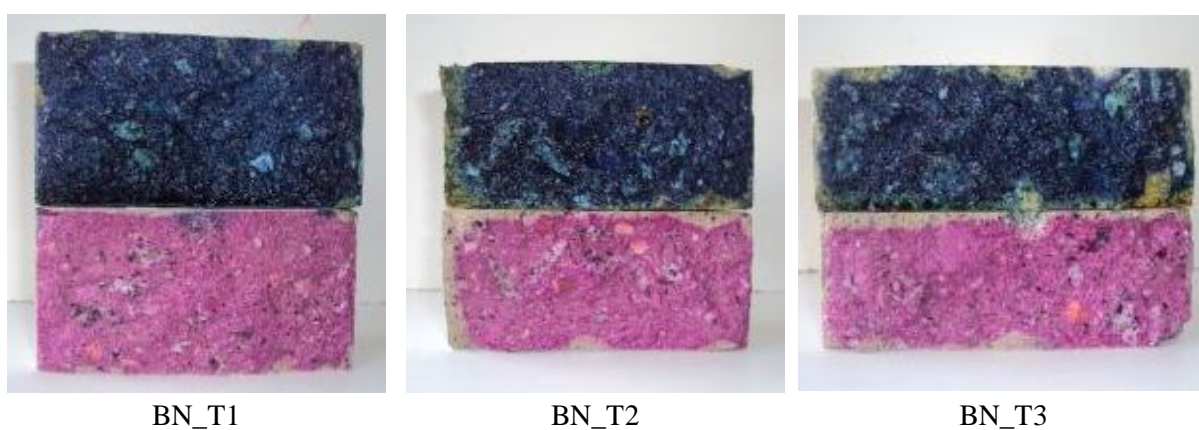


Figura 4.14 – Profundidade de carbonatação em provetes com tinta – 28 dias

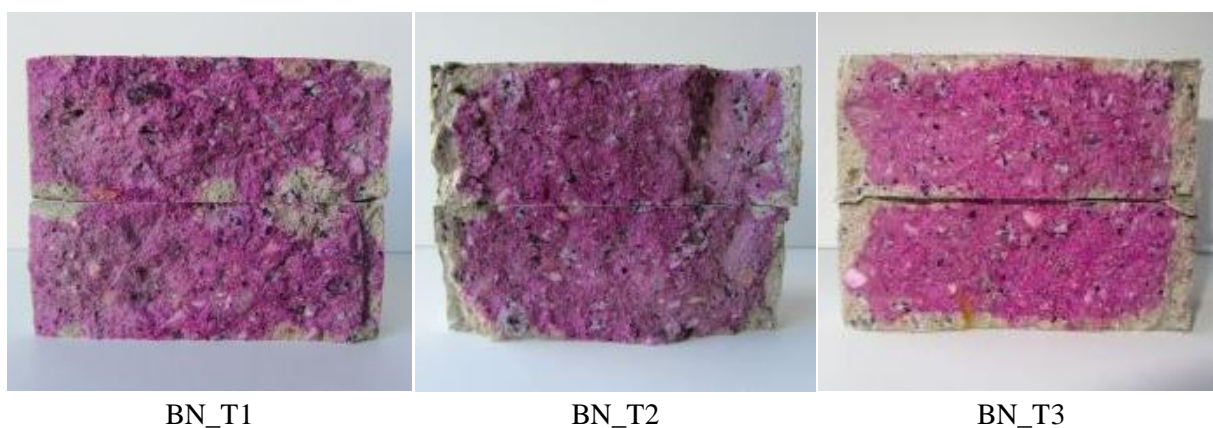


Figura 4.15 – Profundidade de carbonatação em provetes com tinta – 56 dias

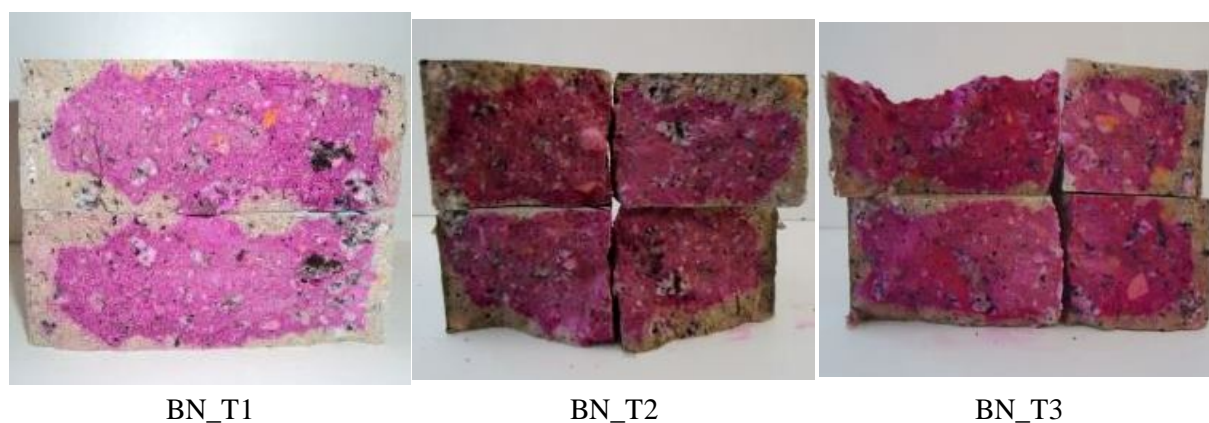


Figura 4.16 – Profundidade de carbonatação em provetes com tinta – 90 dias

Segundo as leituras efetuadas aos provetes acima ilustrados, no Quadro 4.5 e no Quadro 4.6 apresentam-se as profundidades médias de carbonatação, o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada betão para diferentes idades. Os espaços vazios na coluna da profundidade média de carbonatação do Quadro 4.5 indicam que o betão na idade em questão se encontra totalmente carbonatado. Esta situação acontece no BAA1 e no BAA2 para as idades superiores ou iguais a 28 dias. Na Figura 4.17 pode verificar-se o estado atrás referido, pois a partir da terceira leitura os provetes das misturas de BAA1 e BAA2 estão completamente carbonatados. Analisando a profundidade de carbonatação das misturas de BAA, verifica-se que estas carbonataram muito rapidamente, tendo os provetes ficado completamente carbonatados aos 28 dias, enquanto a mistura de BN apresentou uma profundidade de carbonatação máxima de cerca de 15 mm. Já os provetes da mistura de UHPC não apresentam qualquer sinal de carbonatação durante todo o tempo de ensaio.

O facto de os provetes de BAA terem carbonatado muito mais rápido é algo que estará relacionado com a porosidade do material. A explicação para os resultados obtidos exigiria a realização de ensaios suplementares, como por exemplo o ensaio de porosimetria de mercúrio.

Um aspeto que convém realçar na Figura 4.18 é o facto de, nos provetes BN\_T2 e BN\_T3, a profundidade média de carbonatação diminuir dos 56 para os 90 dias. Esta situação anormal pode dever-se à espessura da camada de tinta aplicada em cada provete.

Quadro 4.5 – Leituras da frente de carbonatação

Idade (dias)	BN			BAA1			BAA2			UHPC		
	Pcarb (mm)	S	CoV (%)	Pcarb (mm)	S	CoV (%)	Pcarb (mm)	S	CoV (%)	Pcarb (mm)	S	CoV (%)
0	0,00	0,00	---	0,00	0,00	---	0,00	0,00	---	0,00	0,00	---
14	4,65	0,17	3,72	35,24	4,73	13,41	37,76	3,24	8,57	0,00	0,00	---
28	7,29	0,52	7,08	---	---	---	---	---	---	0,00	0,00	---
56	11,52	0,37	3,24	---	---	---	---	---	---	0,00	0,00	---
90	15,53	0,69	4,47	---	---	---	---	---	---	0,00	0,00	---

Quadro 4.6 – Leituras da frente de carbonatação com influência da tinta

Idade (dias)	BN_T1			BN_T2			BN_T3		
	Pcarb (mm)	S	CoV (%)	Pcarb (mm)	S	CoV (%)	Pcarb (mm)	S	CoV (%)
28	0,00	0,00	---	1,35	1,98	146,93	2,28	0,97	42,78
56	1,27	0,64	50,45	5,81	1,09	18,83	4,93	1,44	29,16
90	4,47	2,75	61,60	3,52	2,30	65,47	4,26	0,88	20,70

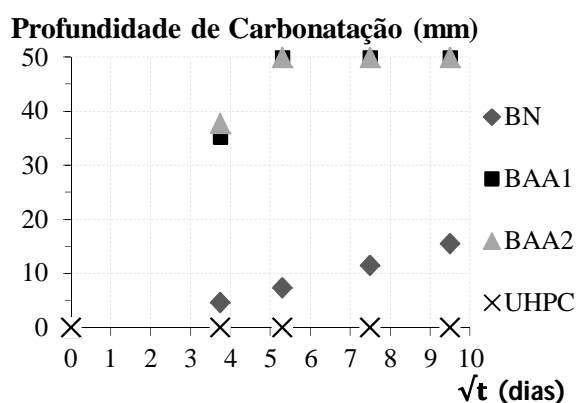


Figura 4.17 – Profundidade de carbonatação vs. tempo

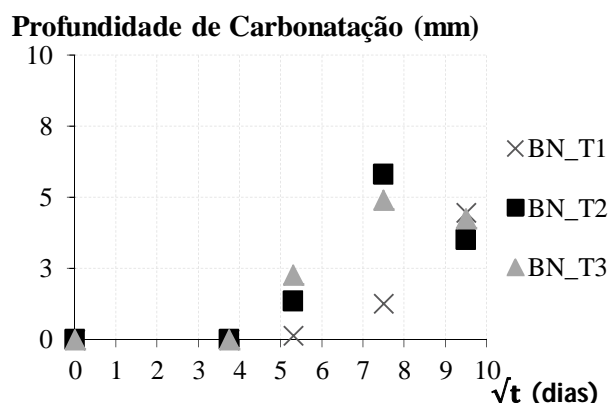


Figura 4.18 – Profundidade de carbonatação vs. tempo dos provetes com tinta

Comparando os resultados entre o BN e os BN's com camada protetora constata-se que os betões com pintura apresentam uma menor profundidade de carbonatação que os betões sem revestimento protetor (Figura 4.19). Relativamente às misturas de BN com tinta pode observar-se que a tinta 1 é aquela que parece apresentar menor penetração de dióxido de carbono, embora a leitura aos 90 dias demonstre o contrário, esta situação pode ser explicada devido ao facto da pintura não ter ficado homogénea ou com a mesma espessura em todos os provetes ensaiados. Entre as misturas de BN\_T2 e de BN\_T3, de acordo com a Figura 4.19, pode dizer-se que ambas apresentam uma profundidade de carbonatação com valores muito semelhantes.

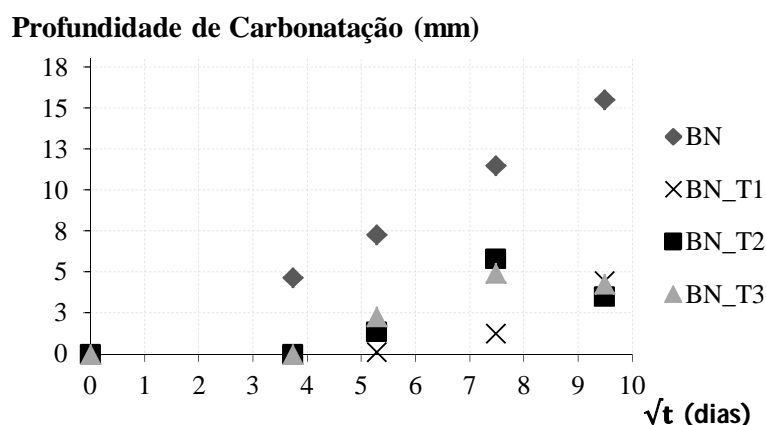


Figura 4.19 – Profundidade de carbonatação vs. tempo

#### 4.1.4 Resistividade Elétrica

Os ensaios de resistividade elétrica foram feitos segundo o procedimento explicitado no ponto 3.5.4. Como a altura e o diâmetro dos provetes são parâmetros necessários à determinação da resistividade elétrica, inicialmente optou-se por fazer a medição destas características de forma a precisar a constante K (Quadro 4.7)

Quadro 4.7 – Dimensões dos provetes

Mistura	Provete	Diâmetro (mm)	Altura Média (L) (mm)	Área (S) (mm <sup>2</sup> )	K = S / L (mm)	K (m)
BN	BN.1	99,84	48,99	7828,87	159,79	0,16
	BN.2	99,79	49,38	7821,03	158,37	0,16
	BN.3	99,9	48,76	7838,28	160,76	0,16
BAA1	BAA1.1	99,94	48,97	7844,56	160,18	0,16
	BAA1.2	99,95	49,34	7846,13	159,02	0,16
	BAA1.3	99,93	50,00	7842,99	156,86	0,16
BAA2	BAA2.1	99,97	48,79	7849,27	160,87	0,16
	BAA2.2	99,93	48,92	7842,99	160,32	0,16
	BAA2.3	99,84	48,84	7828,87	160,29	0,16

De acordo com as medições efetuadas no Quadro 4.8, apresentam-se as resistividades elétricas médias, o desvio padrão e o coeficiente de variação das diferentes misturas estudadas para as idades de 14, 28, 56 e 90 dias após cura do betão.

Quadro 4.8 – Resistividade elétrica para idades diferentes

Idade (dias)	BN			BAA1			BAA2		
	$\rho_{Média}$ (k $\Omega$ m)	S	CoV (%)	$\rho_{Média}$ (k $\Omega$ m)	S	CoV (%)	$\rho_{Média}$ (k $\Omega$ m)	S	CoV (%)
14	70,22	9,99	14,22	23,17	4,04	17,42	25,20	1,68	6,68
28	86,86	17,04	19,62	27,40	3,54	12,90	24,77	1,61	6,49
56	89,22	15,21	17,05	43,38	3,77	8,69	29,39	2,03	6,89
90	84,36	17,06	20,23	40,83	3,22	7,88	28,52	0,82	2,89

Através do Quadro 4.8, pode verificar-se que a resistividade elétrica média do BN é significativamente superior à dos betões ativados alcalinamente e que o maior valor de coeficiente de variação é de 20,23 %.

A dispersão de resultados pode ser identificada através das Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 onde é possível fazer uma comparação entre as médias dos valores registados. Os coeficientes de variação médios para o BN, o BAA1 e o BAA2 são respetivamente 17,78%, 11,72% e 5,74%.

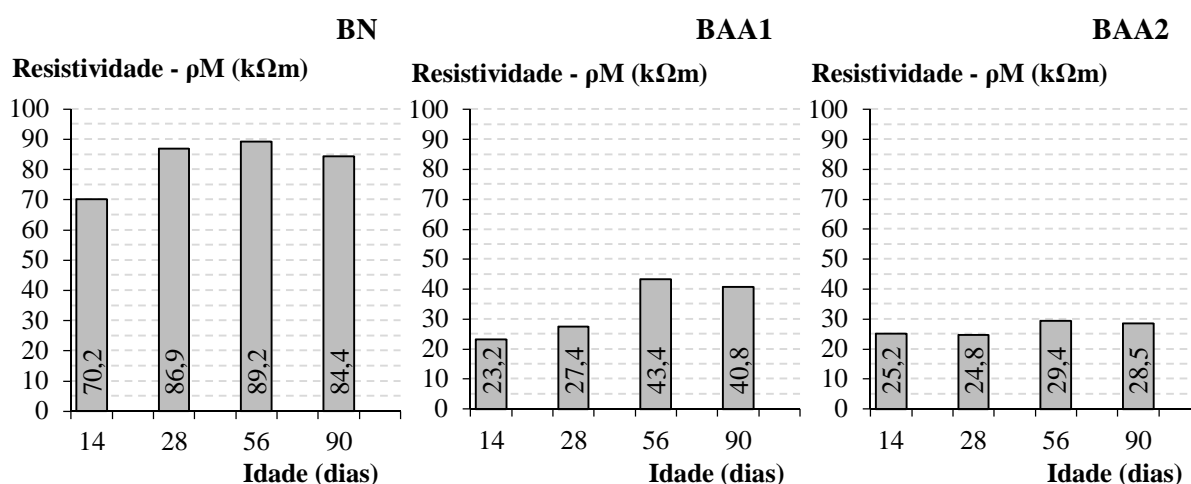


Figura 4.20 – Resistividade Elétrica – BN

Figura 4.21 – Resistividade Elétrica – BAA1

Figura 4.22 – Resistividade Elétrica – BAA2

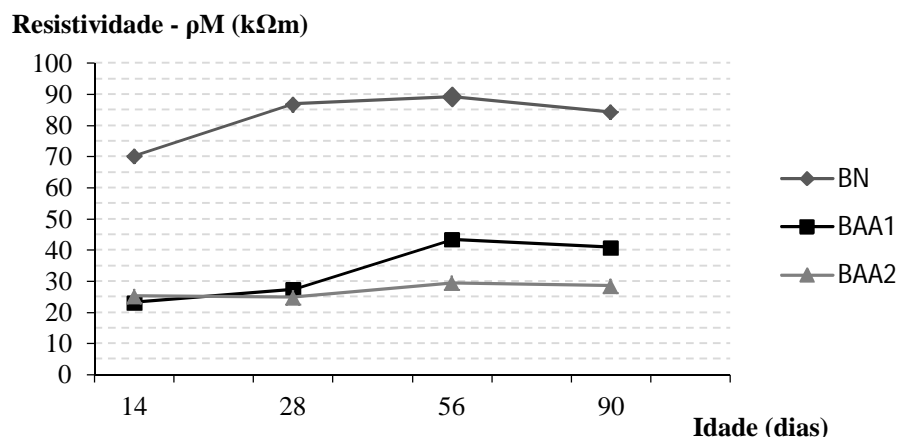


Figura 4.23 – Variação da resistividade elétrica em função da idade

Analisando a Figura 4.23, é possível verificar que a resistividade média de cada betão aumenta com o tempo. No entanto, dos 56 para os 90 dias, observou-se uma ligeira descida de valor na leitura. Esta situação pode dever-se à temperatura ambiente em que foi realizado o ensaio (no dia do ensaio dos 90 dias a temperatura ambiente era mais elevada que nos dias dos restantes ensaios). Polder e Peelen (2002) afirmam que tanto o aumento da humidade como o aumento da temperatura resultam numa diminuição da resistividade elétrica do betão. Comparando os valores entre os diferentes tipos de betão constata-se que o valor da resistividade é maior para o BN, enquanto para ambas as misturas de BAA o valor é cerca de 35 kΩm, em média.

## 4.2 Comparação dos resultados dos diferentes ensaios

Fazendo uma comparação entre os resultados dos diferentes ensaios, constata-se que a mistura BN apresenta valores de profundidade de carbonatação bastante inferiores ao das misturas de BAA e valores de resistividade superiores, cerca de 300 % superiores aos 14 dias e 100% aos 90 dias. Estes resultados são coerentes com os obtidos por Ferreira (2000), que refere que quanto maior o valor da resistividade do betão, maior a sua durabilidade. Outro parâmetro muito importante que poderá ser comparado com os valores da resistência à carbonatação é o coeficiente de absorção por capilaridade,  $S_a$ , pois como referido anteriormente, quanto maior o valor de  $S_a$  maior será a porosidade do material e conseqüentemente maior a profundidade de penetração de  $CO_2$ . Pelos resultados dos ensaios constata-se que as misturas de BN e de BAA2 apresentam valores de  $S_a$  bastante mais baixos (0,72 e 1,07, respetivamente) do que a mistura de BAA1 (3,1). No entanto, a profundidade de carbonatação no BAA1 é inferior à da do BAA2. Por fim, comparando os valores da resistência à compressão com os valores da profundidade de carbonatação, verifica-se que apesar de as misturas de BN e de BAA2 terem

aproximadamente a mesma resistência, o BAA2 apresenta um pior desempenho quando comparada com a mistura BN.



## 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

Neste capítulo, encontram-se as conclusões relativas ao trabalho realizado, sintetizando-se todas as observações e conclusões relevantes decorrentes do trabalho experimental.

No que diz respeito à resistência à compressão, pode concluir-se que as misturas de BAA1 aumentam em média cerca de 23%, entre 7 e 90 dias, enquanto na mistura BN a resistência aumenta cerca de 37%.

Do ensaio de absorção de água por capilaridade, calculou-se o valor de coeficiente de absorção capilar, tendo-se obtido valores bastante diferentes, especialmente para as misturas de betão ativado alcalinamente. Enquanto para o BAA1 se observou um valor médio de 3,1, para a mistura de BAA2 obteve-se um valor médio de 1,07, o qual é da mesma ordem de grandeza do que se obteve para o BN, 0,72. Destes resultados, conclui-se que o BAA1 apresenta maior porosidade do que os restantes dois.

Observando as leituras dos ensaios, verifica-se que a resistividade média do betão aumenta com o tempo, e que os valores da resistividade para os BN, BAA1 e BAA2 aos 90 dias são, respetivamente, 84,4 k $\Omega$ m, 40,8 k $\Omega$ m e 28,5 k $\Omega$ m. Dos 56 para os 90 dias, há uma ligeira descida de valor na leitura, resultado atribuído à diferença de temperatura ambiente em que o ensaio foi realizado. Este resultado é coerente com as conclusões de Polder e Peelen (2002) que verificaram que o aumento da humidade e de temperatura resultam numa diminuição da resistividade elétrica do betão. Destes resultados pode concluir-se que o BN apresenta, em média, uma resistividade 240% superior ao BAA1 e BAA2.

Segundo as leituras efetuadas no ensaio da carbonatação acelerada, pode constatar-se que o BAA1 e o BAA2 se encontram totalmente carbonatados para idades superiores ou iguais a 28 dias, o BN sofre um aumento da profundidade de carbonatação gradualmente até cerca de 15 mm de profundidade e o UHPC não apresenta sinal de penetração de CO<sub>2</sub> até ao final dos 90 dias de ensaio. O facto dos provetes de BAA terem carbonatado rapidamente necessita de ser melhor estudado, devendo estar relacionado com a porosidade do material. No entanto, avaliando os resultados observados, conclui-se que o UHPC e o BN resistem mais à carbonatação que o BAA1 e BAA2. A resistividade permite também confirmar esta



conclusão. No caso do BN, a resistividade era superior ao BAA1 e ao BAA2 (superiores cerca de 300% aos 14 dias e 100% aos 90 dias). Com base nos resultados obtidos por Ferreira (2000), quanto maior o valor da resistividade do betão, maior será a sua durabilidade. Os resultados de carbonatação obtidos no presente trabalho confirmaram um melhor desempenho à durabilidade do BN face ao BAA1 e ao BAA2.

Utilizar uma tinta protetora para resistência à carbonatação revela-se uma opção acertada, já que se verificou que se consegue reduzir a penetração de dióxido de carbono entre 20% a 30%, em comparação com um betão sem qualquer tipo de camada protetora. No entanto, a aplicação da tinta deve ser feita de forma correta e com espessura suficiente, de forma a impedir a incursão de agentes agressivos no betão. Das 3 tintas ensaiadas, a tinta 1 parece ser aquela que apresenta melhor desempenho, embora, no ensaio dos 90 dias tenha demonstrado pior desempenho que as restantes tintas. Esta incongruência pode ser explicada com o facto de a pintura não ter ficado homogénea ou com a mesma espessura em todos os provetes, o que confirma ainda mais a importância de uma boa aplicação da camada de revestimento. Da mesma forma se pode explicar o facto da profundidade média de carbonatação dos provetes de betão normal protegidos com tinta 2 e protegidos com tinta 3 diminuir dos 56 para os 90 dias.

## 5.2 Trabalhos futuros

Nesta última secção apresentam-se propostas a desenvolver no futuro, decorrentes da experiência adquirida na dissertação. Sendo assim, sugere-se um estudo:

- mais aprofundado da leitura do pH dos provetes, no ensaio de resistência à carbonatação, recorrendo-se a um exame químico. Esta medida tem como objetivo proporcionar uma leitura mais fidedigna da frente de carbonatação;
- da resistência à carbonatação de misturas de betão ativado alcalinamente sujeitas a diferentes condições de cura;
- relacionando a profundidade de carbonatação com a distribuição dimensional da porosidade, recorrendo-se a ensaios com porosímetro de mercúrio;
- para um tempo superior a 90 dias, complementando-se assim os resultados desta dissertação que apenas incidiram nos primeiros 90 dias de idade dos vários betões ensaiados;
- versando outros ensaios complementares, nomeadamente: penetração de água à pressão atmosférica e sob vácuo e ensaio de penetração de cloretos.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adam, A.A. (2009). “Strength and Durability Properties of Alkali Activated Slag and Fly Ash-Based Geopolymer Concrete”. Tese de Doutorado, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, RMIT University., Melbourne, Australia.
- Alexander, M.G., Santhanam M., and Ballim Y. (2009). “Durability design and specification for concrete structures - the way forward”. International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics, Vol. 2, pp. 95-105.
- Bastos, P. (1999). “Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibras de aço”. Tese de Doutorado, Engenharia de Estruturas, Universidade de S.Paulo, São Paulo.
- Bilek V. (2007). “Alkali-activated concrete for the production of building elements”. Alkali Activated Materials - Research, Production and Utilization 3rd Conference, Praga, pp.71-81.
- Buchwald, A., Hilbig, H., Kaps, C. (2007). “Alkali-activated metakaolin-slag blends - performance and structure in dependence of their composition”. Journal Materials Science, Vol. 42, pp. 3024-3032.
- Camões, A (2006). “Inovação em Betões - Nova normalização e produção de betões especiais”. Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho /CONSTRUNOR 2006, Braga.
- Cengiz D.A. (2003). “Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash” Construction and Building Materials, Vol. 17, pp. 147-152.
- Chang, E.H. (2009). “Shear and bond behaviour of reinforced fly ash-based geopolymer concrete beams”, Tese de Doutorado, Department of Civil Engineering, Curtin University of Technology, Perth.
- Cheng, T.W., Chiu, J.P. (2003). “Fire resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag”. Minerals Engineering, Vol. 16, Nº. 3, pp. 205-210.
- Costa, H.S. (2012). “Betões estruturais de agregados leves. Aplicações em prefabricação e reforço de estruturas”. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Coutinho, A.S. (2006). "Fabrico e Propriedades do Betão", Vol. II - curso 120, LNEC.

- 
- Coutinho, J.S. (1998). “Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem”. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Davidovits J. (1994). “Geopolymers: inorganic polymeric new materials”. *Journal of Materials Education*, Vol. 16, pp. 91-138.
- Davidovits, J. (1999). “Chemistry of geopolymeric systems”. Terminology. *Proceedings of 99 Geopolymere Conference*, Vol. 1, pp. 9-40.
- Davidovits, J. (2005). “Geopolymer chemistry and sustainable development. The Poly(sialate) terminology: a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry”. *Proceedings of 2005 Geopolymere Conference* Vol. 1, pp. 9-15.
- Deer, W., Howie, R., Zussman, J. (2000). “Minerais constituintes das rochas”. Edição da Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Dolezal, J., Skvara, F., Svoboda, P., Sulc, R., Kopechy, L., Pavlasova, S., Myskova, L., Lucuk, M., Dvoracek, K. (2007). “Concrete based on fly ash geopolymers”. *Alkali Activated Materials - Research, Production and Utilization 3rd Conference*. Praga, República Checa, pp. 185-197.
- Duracrete (1999). “Compliance Testing for Probabilistic Purposes”. Document BE95-1347/R8. The European Union - Brite EuRAM III, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures.
- Duxson, P., Provis J. (2008). “Low CO2 concrete - are we making any progress?”. *BEDP Environment Design Guide*, Royal Australian Institute of Architects, PRO24.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A e Ruvuelta, D. (2009). “Alkali activation of industrial by-products to develop new earth-friendly cements”. *11th International Conference on Non-Conventional Materials And Technologies (NOMAT 2009)*, Bath, UK.
- Fernandez-Jimenez, A.,I. García-Lodeiro, *et al.* (2007). “Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials.” *Journal of Materials Science*, Vol. 42, pp. 3055–3065.
- Fernandez-Jimenez, A.; Palomo, J.; Puertas, F. (1999) “Alkali activated slag mortars. Mechanical strength behaviour”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 1313-1321.
- Ferreira, R.M. (2000), “Avaliação de Ensaio de Durabilidade do Betão”, Tese de Mestrado, Universidade do Minho.
- Ferreira, L., Barata, I., Júlio, E., Coelho, J. (2012). “Formulação de Argamassas Ativadas Alcalinamente, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2012”. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 24 a 26 de Outubro.
- Figueiredo, E.P. (2005). “Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto”. *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON*, Vol. 2, pp. 829-855, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo.
-

- Garcia-Lodeiro, I., A. Palomo, *et al.* (2007). “Alkali-aggregate reaction in activated fly ash systems”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, Issue 2, pp. 175-183.
- Gehlen C. (1999). “Compliance Testing for Probabilistic Design Purposes”.
- Glukhovskiy, V. D., Rostovskaya, G. S., Rumyna, G.V. (1980). “High strength slag-alkali cement”. 7<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cements, Paris, France, III, pp. 164-168.
- Gomes, C.S. (1986) “Argilas o que são e para que servem”. Fundação Calouste Gulbenkian.
- Gonçalves, A., Salta, M.M. (1996). “Métodos de caracterização da resistência dos betões em ambientes agressivos”, *Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado*, Seminário, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Outubro, pp. 13-55.
- Gourley, J.T., Johnson, G.B. (2005). “Developments in geopolymer precast concrete”. *Proceedings of Geopolymer 2005 World Congress, Geopolymer Green Chemistry and Sustainable Development Solutions*, S. Quentin, France pp. 139-143.
- Granizo, L.M., Blanco-Varela, M.T., Martinez-Ramirez, S. (2007). “Alkali activation of metakaolins: parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties”. *Journal Materials Science*, Vol. 42, pp. 2934-2943.
- Granizo, M. L (1998). “Activation alcalina de metacaolin: Desarrollo de nuevos materiales cementantes”. Tese de Doutoramento, Universidad Autonoma de Madrid.
- Hardjito, D., Rangan, B.V. (2005). “Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete”, *Research Report GC1*, Curtin University of Technology - Faculty of Engineering, Perth, Australia.
- Kong, D.L., J.G. Sanjayan, *et al.* (2007). “Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures.” *Cement and Concrete Research* Vol. 37, Issue 12, pp. 1583-1589.
- Lee, W.K., Deventer, J.S. (2002). “The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 577-584.
- LNEC E-372 (1993). “Água de amassadura para betões: Características e verificação da conformidade”. LNEC, Lisboa.
- LNEC E-391 (1993). “Betões: Determinação da resistência à carbonatação”. LNEC, Lisboa.
- LNEC E-393 (1993). “Betões: Determinação da absorção de água por capilaridade”. LNEC, Lisboa.
- LNEC E-464 (2007). “Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projeto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais”. LNEC, Lisboa.

- Matsushita F., Aono Y., Shibata S. (2000). "Carbonation degree of autoclaved aerated concrete" *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp 1741-1745.
- Miranda, J.M., A. Fernandez-Jimenez, *et al.* (2005). "Corrosion resistance in activated fly ash mortars". *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, Issue 6, pp. 1210-1217.
- NP 2064 (1991). "Cimentos: Definições, composição, especificações e critérios de conformidade". IPQ, Portugal.
- NP-EN 12390-3 (2009). "Ensaio de betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes". IPQ, Portugal.
- NP-EN 206-1 (2007). "Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade". IPQ, Portugal.
- NP-EN 933-1 (2000). "Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração". IPQ, Portugal.
- NT BUILD 357 (1989). "Concrete, repairing materials and protective coating: Carbonation resistance". Nordtest method.
- Olivia, M.,P. Sarker, *et al.* (2008). "Water penetrability of low calcium fly ash geopolymer concrete". *International Conference on Construction and Building Technology*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 517-530.
- Palomo, A., M. W. Grutzeck, M. T. Blanco (1999). "Alkali-Activated Fly Ashes, A Cement for the Future." *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 1323-1329.
- Parrott, L.J. (1990). "Carbonation, corrosion and standardization". *Proceedings of International Conference*, Dundee, Scotland, pp. 1009-1023.
- Perinet, G., Contenson, H., Courtois, L. (1980). "Étude minéralogique de vaisselles blanches de Ras-Shamra et Tell Ramad (Syrie)". *Compte Rendu Acad. Sci.*, pp. 143-144.
- Polder, R.B., Peelen, W.H.A. (2002). "Characterization of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 24, Issue 5, pp. 427-435.
- RILEM draft recommendation CPC-18 (1984). "Measurement of hardened concrete carbonation depth". *Materials and Structures*.
- Rodrigues, M.P. (1996). "Protecção do betão com revestimentos orgânicos". Seminário, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Rostovskaya, G., Ilyin, V., Blazhis, A. (2007). "The service properties of the slag alkaline concretes". *Alkali Activated Materials - Research, Production and Utilization 3rd Conference*, Praga, pp. 593-610.

- 
- Roy, D.M. (1999). “Alkali-activated cements. Opportunities and challenges”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 249-254.
- Schnitzler S (2006). “Autoclaved Aerated Concrete as a Green Building Material”. *Applied Research Paper on Sustainability and the Built Environment*, University of California, Davis.
- Shi, C., Krivenko, P., Roy, D. (2006). “Alkali-Activated Cements and Concretes”. Taylor and Francis, London and New York, pp. 313-319.
- Silva, P.F. (1995). “Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana”. 1º Ed.: Editora Pini – Serrana, pp. 152.
- Simas M. (2007). “Sistemas de protecção do betão face à carbonatação”. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Song, X., M. Marosszeky, et al. (2005). “Durability of fly ash based geopolymer concrete against sulphuric acid attack”. 10th International Conference on the Durability of Building Materials and Components. Lyon, France, pp. 369-375.
- Soretz, S. (1966). “La protección contra la corrosión en los hormigones armado y pretensado.”. *Materiales de Const., Últimos avances*, nº126.
- Swanepoel J.C., Strydom C.A. (2002). “Utilisation of fly ash in a geopolymeric material”. *Applied Geochemistry*, Vol. 17, pp. 1143-1148.
- UNE 83988-1 (2006). “Durabilidad del hormigón. Determinación de la Resistividad Eléctrica Parte 1: Método Directo (Método de referencia)”. AEN/CTN 83 - Hormigón.
- UNE 83993-1 (2013). “Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido. Parte 1: Método natural”. AFN/CTN 83 - Hormigón.
- Wallah, S. E., Rangan B.V. (2006). “Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties”. Research Report GC2. Perth, Australia, Curtin University of Technology - Faculty of Engineering.
- Xu H., Deventer J.S.J., Jannie S.J. (2002). “Geopolymerisation of multipleminerals”. *Min Eng*, Vol. 15, Issue 12, pp. 1131–1139.
- Yang, K.H., Song, J.K., Ashraf, A., Lee, E.T. (2007). “Properties of cementless mortars activated by sodium silicate”. *Materials and Structures* (2010), Vol. 43, pp. 403–416.
- Zhijua, P., Dongxu, L., Jian, Y., Nanry, Y. (2003). “Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud-slag cementitious material”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1437-1441.
-

## ANEXOS

Quadro A.1 – Dados referentes a aspetos técnicos da tinta 1

Tinta 1		
Descrição do Produto	É um revestimento monocomponente, baseado em resinas metacrílicas, resistente às intempéries, aos álcalis e ao envelhecimento, formulado para utilização em superfícies minerais, incluindo betão e argamassa. Contém solventes. Protege o betão dos agentes atmosféricos agressivos e promove um efeito de autolimpeza sobre as superfícies tratadas. Não altera a textura característica do betão. Cumpre os requisitos da norma NP EN 1504-2 como revestimento de proteção.	
Utilizações	É utilizado para a proteção e decoração de betão e outras bases cimentosas em infra-estruturas e obras de arte. É um revestimento de betão contra a carbonatação, especialmente em ambientes agressivos. <ul style="list-style-type: none"> <li>•proteção contra o ingresso (princípio 1, método 1.3 da NP EN 1504-9).</li> <li>•controlo de humidade (princípio 2, método 2.3 da NP EN 1504-9).</li> <li>•aumento da resistividade (princípio 8, método 8.3 da NP EN 1504-9).</li> </ul>	
Características / Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>•excelente resistência à exposição ambiental, com base numa resina metacrílica com solventes de rápida evaporação.</li> <li>•devido à sua secagem rápida, o revestimento é resistente à chuva após um curto período de tempo.</li> <li>•quase sem alteração da textura característica da superfície do betão.</li> <li>•protege o betão das influências atmosféricas agressivas, que penetram no betão em forma de sais ou gases.</li> <li>•elevada resistência à difusão de CO<sub>2</sub>, reduzindo o efeito da carbonatação.</li> <li>•a permeabilidade ao vapor de água não é afetada.</li> <li>•o revestimento reduz a deposição de sujidade e favorece o efeito de autolimpeza das superfícies.</li> <li>•adequado para o revestimento de betão em obras de arte.</li> </ul>	
Base Química	Resinas acrílicas em solvente.	
Massa volúmica	Aproximadamente 1,4 kg/dm <sup>3</sup> (a +20 °C).	
Teor de sólidos	Aproximadamente 45% (em volume).	
Espessura da camada	Espessura mínima da película seca para garantir características de completa durabilidade = 101 µm. Espessura máxima da película seca para que a espessura de ar equivalente de H <sub>2</sub> O não seja superior a 5 m = 290 µm.	
Coeficiente de difusão de dióxido de carbono (µCO <sub>2</sub> )	Espessura da película seca	d = 130 µm
	Espessura da camada de ar equivalente	S <sub>D</sub> CO <sub>2</sub> =429 m
	Coeficiente de difusão (µCO <sub>2</sub> )	µCO <sub>2</sub> = 3,3 x 10 <sup>6</sup>
	Requisitos para proteção	S <sub>D</sub> CO <sub>2</sub> ≥ 50 m
Coeficiente de difusão de vapor de água (µH <sub>2</sub> O)	Espessura da película seca	d = 140 µm
	Espessura da camada de ar equivalente	S <sub>D</sub> H <sub>2</sub> O = 2,4 m
	Coeficiente de difusão (µH <sub>2</sub> O)	µH <sub>2</sub> O = 1,8 x 10 <sup>4</sup>
	Requisitos para permeabilidade ao vapor	S <sub>D</sub> H <sub>2</sub> O ≤ 5 m

Quadro A.2 – Dados referentes a aspetos técnicos da tinta 2

Tinta 2	
Descrição do Produto	Tinta baseada numa dispersão aquosa de resinas acrílicas fornecida num só componente. Cumpra os requisitos da norma NP EN 1504-2 como revestimento de proteção.
Utilizações	<ul style="list-style-type: none"> <li>• proteção e decoração de rebocos de cimento e betão em exposição atmosférica.</li> <li>• especialmente formulada para ambientes húmidos ou agressivos.</li> </ul>
Características / Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• monocomponente.</li> <li>• capacidade de autolimpeza</li> <li>• resistente a humidades.</li> <li>• resistente a óleos e gorduras.</li> <li>• resiste a atmosfera agressiva.</li> <li>• não forma fungos e bolores.</li> <li>• aquoso – sem solventes.</li> </ul>
Base Química	Resinas acrílicas em dispersão aquosa.
Massa volúmica	Aprox. 1,3 kg/dm <sup>3</sup> .

Quadro A.3 – Dados referentes a aspetos técnicos da tinta 3

Tinta 3	
Descrição do Produto	Verniz incolor de proteção para betão, à base de resinas acrílicas em dispersão aquosa.
Utilizações	<ul style="list-style-type: none"> <li>• proteção de fachadas betão.</li> </ul>
Características / Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• resistente à exposição ambiental e ao envelhecimento.</li> <li>• boa aderência ao betão.</li> <li>• selagem de micro fissuras.</li> <li>• transparente após secagem.</li> <li>• apresenta brilho.</li> <li>• fácil de aplicar.</li> <li>• ecológico – dispersão aquosa isenta de solventes.</li> </ul>
Base Química	Copolímeros acrílicos em dispersão aquosa.
Massa volúmica	1,03 (± 0,02) kg/dm <sup>3</sup> .
Teor de sólidos	31 ± 2% (em volume). 34 ± 2% (em peso).