



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

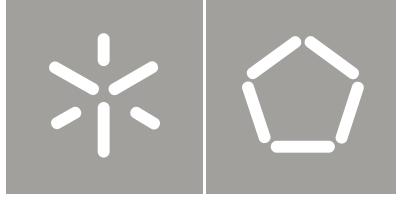
Pedro Gabriel da Silva Campos

Betões Eco-Eficientes com
Elevados Teores de Adições Mineraiis

Pedro Gabriel da Silva Campos
Betões Eco-Eficientes com
Elevados Teores de Adições Mineraiis

UMinho | 2012

Outubro de 2012



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Gabriel da Silva Campos

Betões Eco-Eficientes com
Elevados Teores de Adições Minerais

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Aires Fernando Fernandes Leite
Camões de Azevedo

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação só foi possível devido a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização da mesma, a todos os meus mais sinceros agradecimentos.

Agradeço ao meu orientador Professor Aires Camões, pela sua orientação, disponibilidade e incentivo demonstrados ao longo destes últimos meses.

Aos técnicos do Laboratório Professor Júlio Barreiros Martins do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho por toda a ajuda e disponibilidade demonstrada, em especial ao Engenheiro Carlos Jesus.

Ao Marcos Alyssandro Soares dos Anjos, pela sua ajuda e partilha de conhecimentos, os quais em muito contribuíram para a realização desta dissertação.

Uma palavra de apreço para as empresas que forneceram os materiais necessários à realização desta dissertação, sendo elas a: BASF, Portugal; CIMPOR – Cimentos de Portugal, SGPS, S.A.; Endesa Generation, S.A.; Mibal – Minas de Barqueiro, S.A.; Calcidrata - Indústrias de Cal, S.A.; Britaminho, Granitos e Britas do Minho, Lda.; José de Oliveira Nogueira & Filhos S.A.

A todos os colegas que me apoiaram e acompanharam durante todas as etapas da minha formação superior, o seu apoio e amizade foram fundamentais para chegar até aqui.

A todos os meus amigos e amigas pela amizade, apoio e motivação demonstrados, para além dos tempos de descontração que passamos juntos. Vocês sabem quem são...

Por fim, e como os últimos são sempre os primeiros, agradeço do fundo do coração, aos meus pais e irmã, pelo apoio, incentivo e confiança depositada em mim. Aos meus, pelo esforço e sacrifício que fizeram para me darem a possibilidade de tirar um curso superior e me tornar Engenheiro Civil.

RESUMO

É do conhecimento geral que cada tonelada de cimento produzida é responsável pela emissão de uma tonelada de CO₂ para a atmosfera e, considerando o gigantesco volume de cimento produzido mundialmente, qualquer redução significativa na sua produção e consumo, trará vantagens ecológicas significativas.

De modo a contribuir para sustentabilidade da construção, a presente dissertação pretende dar um contributo para a redução do consumo de cimento, através da sua racionalização, substituindo elevados volumes de cimento no fabrico de betões por adições, nomeadamente subprodutos industriais, tais como as cinzas volantes. Contudo, betões com elevados volumes de cinzas volantes possuem alguns inconvenientes, os quais têm impedido a sua generalização, pelo que se tentou mitigar tais inconvenientes, através da incorporação de outras adições minerais (metacaulino e cal hidratada), que possam corrigir os principais inconvenientes associados a este tipo de betões. Ainda relacionado com a eco-eficiência deste material, procurou-se produzir um betão auto-compactável, evitando assim a necessidade de vibração e consequente poluição sonora, para além, de se evitar decréscimos na durabilidade das estruturas resultantes de uma deficiente compactação do betão.

Para tal, desenvolveu-se um programa experimental capaz de caracterizar o desempenho, face à resistência e durabilidade, de misturas binárias, ternárias e quaternárias, produzidas com elevados volumes de cinzas volantes e pequenas percentagens de metacaulino e cal hidratada. Da análise dos resultados obtidos é possível evidenciar que a sinergia resultante destas misturas revelou desempenhos promissores, concluindo-se que é possível produzir betões auto-compactáveis com elevados volumes de cinzas volantes e, pequenas percentagens de metacaulino e cal hidratada, com desempenhos mecânicos e de durabilidade adequados à maioria das infra-estruturas correntes, a um custo bem mais reduzido que o preconizado actualmente pelo betão corrente, podendo-se traduzir numa solução viável para a obtenção de um betão eco-eficiente.

PALAVRAS-CHAVE

Betão eco-eficiente; Betão auto-compactável; Adições pozolânicas; Resistência à compressão; Durabilidade

ABSTRACT

It is common knowledge that every ton of cement produced is responsible for emitting a ton of CO₂ into the atmosphere and considering the huge amount of cement produced worldwide, any significant reduction in its production and consumption, will bring significant environmental benefits.

In order to contribute to sustainable construction, the present paper aims to contribute to the reduction in cement consumption through its rationalization, replacing large volumes of cement by additions, including industrial byproducts such as fly ashes. However, concrete with high volumes of fly ashes have some drawbacks which have prevented its widespread and it is attempted to mitigate these drawback by incorporating other mineral additions (metakaolin and hydrated lime) which can fix the main drawback associated to this type of concrete. Also related to the eco-efficiency of this material, we sought to produce a self-compacting concrete, avoiding the need for vibration and subsequent noise, as well, preventing a decrease in durability of the structures as a result of a poor compaction of the concrete.

To this end, it was developed an experimental program able to characterize the performance, concerning to the strength and durability of binary, ternary and quaternary mixtures, with high volumes of fly ash and small percentages of metakaolin and hydrated lime. After the analysis of the results, the synergy resulting from the mixtures showed promising performances, concluding that it is possible to produce self-compacting concretes with high volumes fly ash and small percentages of metakaolin and hydrated lime, with mechanical and durability performances suitable for the most current infrastructure at a much lower cost than the traditional concrete, which could represent a viable solution to obtain an eco-efficient concrete.

KEYWORDS

Eco-efficient concrete, Self-compacting concrete, Pozzolanic admixtures, Compressive strength, Durability

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE QUADROS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objectivos e Metodologia	3
1.3. Organização da Dissertação	5
2. ESTADO DO CONHECIMENTO	7
2.1. Sustentabilidade da Indústria Cimenteira e do Betão	7
2.2. Adições Minerais	10
2.2.1. Materiais Pozolânicos.....	12
2.2.1.1. Cinzas Volantes.....	13
2.2.1.2. Metacaulino	17
2.2.1.3. Cal Hidratada.....	19
2.3. Betões com Elevados Teores de Cinzas Volantes	21
2.4. Betão Auto-Compactável.....	26
2.4.1. Generalidades	26
2.4.2. Vantagens e Inconvenientes	29
2.4.3. Aplicações Práticas.....	30
3. MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	31
3.1. Características dos Materiais Utilizados.....	31
3.1.1. Cimento	31
3.1.2. Cinzas Volantes	33
3.1.3. Metacaulino	33
3.1.4. Cal Hidratada.....	34
3.1.5. Agregados.....	35
3.1.6. Água	37

3.1.7.	Superplastificante	38
3.2.	Composições Estudadas.....	39
3.3.	Ensaio Realizados	40
3.3.1.	Amassadura	41
3.3.2.	Comportamento do Betão Fresco	42
3.3.3.	Moldagem, Conservação, Tipo e Dimensões dos provetes.....	45
3.3.4.	Avaliação do Comportamento Mecânico	46
3.3.4.1.	Resistência à Compressão	46
3.3.5.	Avaliação da Durabilidade	47
3.3.5.1.	Absorção de Água por Capilaridade	47
3.3.5.2.	Absorção de Água por Imersão.....	49
3.3.5.3.	Difusão dos Cloretos	51
3.3.5.4.	Carbonatação.....	55
3.3.5.5.	Resistividade Eléctrica	57
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	59
4.1.	Avaliação do Comportamento do Betão no Estado Fresco	59
4.1.1.	Fluidez e capacidade de preenchimento	59
4.1.2.	Viscosidade.....	62
4.1.3.	Capacidade de passagem	64
4.2.	Avaliação do Comportamento Mecânico.....	65
4.2.1.	Resistência à Compressão	65
4.3.	Avaliação da Durabilidade do Betão	69
4.3.1.	Absorção de Água por Capilaridade.....	69
4.3.2.	Absorção de Água por Imersão à Pressão Atmosférica	74
4.3.3.	Difusão dos Cloretos	76
4.3.4.	Carbonatação	80
4.3.5.	Resistividade Eléctrica	84
5.	CONCLUSÕES.....	88
5.1.	Principais Conclusões	88
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros.....	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Previsão futura do consumo mundial de cimento (IEA, 2009).....	8
Figura 2 - Cinzas volantes (Camões, 2002).....	14
Figura 3 - Fotografias de caulino e caulino incinerado (metacaulino) obtido por microscopia electrónica de varrimento (Sampaio el al., 2001).....	18
Figura 4 - Evolução com o tempo da resistência à compressão de betões com cimento Portland e cinzas volantes, 40% e 60% respectivamente (Camões, 2002).....	23
Figura 5 - Resistência à compressão aos 28 dias para diferentes percentagens de cinzas volantes (adaptado de Durán-Herrera et al. (2010)).....	24
Figura 6 - Resistência à compressão aos 56 dias para diferentes percentagens de cinzas volantes (adaptado de Durán-Herrera et al. (2010)).....	24
Figura 7 - Comparação da proporção de mistura entre um betão auto-compactável e um betão corrente (Gonçalves, 2006).....	28
Figura 8 - Série de peneiros e máquina de agitação para análise granulométrica.....	36
Figura 9 - Curva granulométrica dos agregados.....	37
Figura 10 - Misturadora utilizada.....	41
Figura 11 - Ensaio de espalhamento (Métodos de dosagem de concreto autoadensável, 2009)	43
Figura 12 - Ensaio do funil-V (Métodos de dosagem de concreto autoadensável, 2009).....	43
Figura 13 - Ensaio L-Box (Métodos de dosagem de concreto autoadensável, 2009).....	44
Figura 14 - Ensaio J-Ring (Métodos de dosagem de concreto autoadensável, 2009).....	45
Figura 15 - Moldes e cura dos diversos provetes.....	45
Figura 16 – Prensa hidráulica.....	46
Figura 17 - Ensaio de absorção por capilaridade.....	48
Figura 18 - Ensaio de absorção de água por imersão.....	50
Figura 19 - Exsicador com provetes imersos na solução de Ca(OH)_2	53
Figura 20 - Ensaio de difusão dos cloretos por migração.....	54
Figura 21 - Câmara de carbonatação.....	56
Figura 22 - Esquema de funcionamento da sonda de Wenner (Reis, 2009).....	57
Figura 23 - Medição da resistividade com o RESIPOD.....	58
Figura 24 - Valores do diâmetro de espalhamento (adaptado de Danone, 2006).....	61
Figura 25 - Ensaio de espalhamento no interior do anel J.....	61
Figura 26 - Resistência à compressão até aos 90 dias de idade.....	67

Figura 27 - Curvas de absorção capilar aos 28 dias	71
Figura 28 - Curvas de absorção capilar aos 90 dias	71
Figura 29 - Representação gráfica dos coeficientes absorção capilar	72
Figura 30 - Absorção de água por imersão aos 28 e 90 dias	75
Figura 31 - Coeficiente de difusão dos cloretos por migração	78
Figura 32 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de carbonatação acelerada	82
Figura 33 - Coeficiente de carbonatação	83
Figura 34 - Resistividade eléctrica dos provetes até aos 90 dias.....	86

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Consumo anual de combustíveis fosseis na central termoelétrica do Pego (Tejo Energia, 2010).....	9
Quadro 2 - Produção anual de cinzas volantes na central termoelétrica do Pego (Tejo Energia, 2010).....	10
Quadro 3 – Tipos de cimentos (adaptado da norma NP EN 197-1).....	11
Quadro 4 - Requisitos químicos das cinzas volantes (adaptado da norma NP EN 450-1).....	15
Quadro 5 - Requisitos físicos das cinzas volantes (adaptado da norma NP EN 450-1).....	16
Quadro 6 - Proporções típicas das misturas para diferentes resistências (Malhotra, 2002)	25
Quadro 7 - Composição química do cimento Portland (CIMPOR Betões, 2008).....	32
Quadro 8 - Características físicas do cimento Portland (Ficha técnica).....	32
Quadro 9 - Características mecânicas do cimento Portland (Ficha Técnica).....	32
Quadro 10 - Composição química das cinzas volantes (CIMPOR Betões, 2008)	33
Quadro 11 - Composição química do metacaulino (Anjos, 2012)	34
Quadro 12 - Propriedades físicas da cal hidratada (Calcidrata, 2010)	34
Quadro 13 - Composição química da cal hidratada (Calcidrata, 2010).....	35
Quadro 14 - Análise granulométrica dos agregados.....	36
Quadro 15 - Características dos agregados	37
Quadro 16 - Características técnicas do superplastificante (Ficha Técnica).....	38
Quadro 17 – Composições estudadas e respectivas dosagens.....	40
Quadro 18 – Indicadores para avaliação da fluidez e capacidade de preenchimento.....	60
Quadro 19 - Indicadores para avaliação da viscosidade.....	63
Quadro 20 – Indicadores para avaliação da capacidade de passagem.....	64
Quadro 21 – Resistência à compressão dos provetes ensaiados.....	66
Quadro 22 - Coeficientes de absorção capilar e coeficientes de correlação linear.....	72
Quadro 23 - Absorção de água por imersão e coeficientes de variação	74
Quadro 24 - Diferença de potencial e duração do ensaio (adaptado de LNEC E-463, 2004)..	77
Quadro 25 - Resultados do ensaio de difusão dos cloretos por migração	77
Quadro 26 - Resultados do ensaio de carbonatação acelerada	81
Quadro 27 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica.....	85
Quadro 28 - Risco de corrosão de acordo com a resistividade.....	87

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Nas últimas décadas tem havido uma crescente consciencialização para temas relacionados com as questões ambientais e mudanças climáticas, quer em termos do comum cidadão, bem como por parte dos variados sectores da indústria. Os desafios ambientais, cada vez mais exigentes, com os quais nos deparamos são da inteira responsabilidade do ser humano e, cabe-nos a nós estudar os caminhos a seguir de modo a que possamos contribuir para um futuro mais sustentável.

O sector da construção, nomeadamente a indústria do cimento e betão, desempenha um papel importante, visto ser responsável por inúmeros impactos ambientais, desde a extracção de grandes quantidades de matérias-primas não renováveis, elevados consumos energéticos e consequentes emissões de gases com efeitos de estufa. A imergência meteórica de economias de países como a China e a Índia, o desenvolvimento global e consequente aumento da população mundial, fazem com que o consumo de cimento seja cada vez maior, por forma a suprimir as necessidades dos países em termos de infra-estruturas necessárias ao seu desenvolvimento.

É do conhecimento geral que cada tonelada de cimento Portland produzida é responsável pela emissão de uma tonelada de CO₂, sendo que actualmente se produzem cerca de 2800 milhões de toneladas anuais, a nível mundial. Considerando o gigantesco volume de cimento produzido, qualquer redução significativa na produção de cimento trará grandes vantagens ecológicas.

Uma das formas de redução dos impactos ambientais negativos associados ao cimento é a substituição parcial do mesmo por adições que possuam características pozolânicas ou propriedades hidráulicas latentes. Estas adições podem obter-se a partir de subprodutos ou resíduos industriais, reutilizando os mesmos, evitando assim que acabem o seu ciclo de vida num aterro, conferindo-lhes um destino eco-eficiente.

As centrais termoelétricas, a partir da combustão do carvão produzem grandes quantidades de cinzas volantes, bem como outros subprodutos, estimando-se a produção mundial em cerca de 900 milhões de toneladas. Estes subprodutos industriais possuem características pozolânicas e/ou hidráulicas latentes e podem ser utilizados para o fabrico de betões compostos.

Contudo, a adição de grandes quantidades de cinzas volantes possui alguns inconvenientes que têm impedido a generalização da sua utilização. Para mitigar tais inconvenientes é possível incorporar outras adições minerais capazes de colmatar certos desempenhos mecânicos menos conseguidos por parte da mistura binária, produzindo misturas ternárias ou mesmo quaternárias com um desempenho mais próximo do desejado. Para tal, o metacaulino, proveniente da cozedura do caulino, aparenta ser uma alternativa viável (Reis, 2009), (Reis & Camões, 2010), uma vez que também possui propriedades pozolânicas, sendo, neste caso, uma pozolana muito reactiva ao contrário das cinzas volantes. Para além do metacaulino, a cal hidratada, devido ao seu elevado teor de óxido de cálcio, possibilita o seu emprego em betões com elevados teores de substituição de cimento por adições minerais, pois está é capaz de prover hidróxido de cálcio necessário às reacções pozolânicas, aumentando assim a quantidade das mesmas.

Assim, o estudo de misturas contendo grandes volumes de adições minerais revela-se de extrema importância, para que os investigadores possam estudar a viabilidade de uma utilização mais generalizada deste tipo de misturas, avaliando o betão produzido face aos vários parâmetros de desempenho que lhe são exigidos como a sua resistência mecânica e durabilidade. Estudos já efectuados por vários investigadores demonstram resultados prometedores, o que só trará benefícios a nível do impacto ambiental produzido podendo contribuir de modo significativo para a sustentabilidade da construção.

1.2. Objectivos e Metodologia

Com a realização da presente dissertação pretende-se contribuir para a sustentabilidade da indústria do cimento e do betão, através da redução dos elevados impactos associados a estas indústrias. Assim, esta dissertação tem por objectivo, produzir um betão eco-eficiente, capaz de contribuir para a redução da dependência do consumo de cimento, a partir de misturas compostas, utilizando na sua composição quantidades reduzidas de cimento (aproximadamente 150 kg/m^3) e incorporando na mistura grandes volumes de adições minerais.

A principal motivação para a realização desta dissertação foi no sentido de complementar/validar um estudo efectuado anteriormente por Reis (2009) cujos resultados obtidos permitiram classificar a incorporação de elevados volumes de cinzas volantes e metacaulino como muito promissora. Contudo, esse estudo foi efectuado em argamassas, pretendendo-se agora confirmar e quantificar tais indícios através de campanhas experimentais em betões, utilizando cimento de Portland em vez de um cimento Portland composto, por forma a poder avaliar o verdadeiro potencial das adições minerais utilizadas.

Outro aspecto importante tido em consideração para a realização desta dissertação prende-se com a utilização de cal hidratada. Pretende-se avaliar o efeito da sua incorporação nas misturas produzidas, como forma de mitigar os efeitos adversos da adição de elevados volumes de cinzas volantes à carbonatação, uma vez que estas consomem o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, resultando num decréscimo ou mesmo esgotamento deste, proporcionando assim uma maior velocidade de carbonatação e consequente queda do pH podendo assim despassivar as armaduras, desencadeando o seu processo corrosivo. Com a utilização de cal hidratada, pretende-se aumentar a reserva de hidróxido de cálcio disponível para as reacções pozolânicas, uma vez que esta possui elevados teores de hidróxido de cálcio.

Neste sentido, procedeu-se à definição e estudo de várias composições (binárias, ternárias e quaternárias) onde se fazem variar as quantidades de materiais a incorporar nas composições, caracterizando a sua trabalhabilidade no estado fresco, bem como, o seu desempenho mecânico e a sua durabilidade no estado endurecido, através de ensaios laboratoriais.

Pretende-se assim, verificar se com a incorporação de elevados volumes de adições minerais é possível manter ou mesmo melhorar o desempenho mecânico e a durabilidade do betão convencional, produzido à base de cimento Portland, avaliando qual a eficiência das várias misturas, verificando, se as misturas ternárias e quaternárias permitem evidenciar ganhos adicionais relativamente as misturas binárias, onde apenas existe a incorporação de uma adição mineral, tentando assim encontrar a mistura mais eficaz.

De modo a contribuir para a eco-eficiência dos betões produzidos, para além da substituição de grandes volumes de cimento por adições minerais, optou-se por produzir betões com características auto-compactáveis. Pretende-se assim, tirar partido da capacidade de auto-compactação do betão e das vantagens que lhe estão associadas, como a eliminação dos problemas de durabilidade associados a uma deficiente compactação aquando da sua colocação em obra, à qual se acresce a redução da poluição sonora resultante do nível de ruído provocado pela compactação betão tradicional no local de construção.

Os meios necessários à realização da dissertação encontram-se devidamente assegurados, quer no que respeita à sua parte teórica, nomeadamente através da pesquisa bibliográfica no âmbito do temática a estudar, bem como, na sua parte prática, sendo o programa experimental efectuado no Laboratório *Professor Júlio Barreiros Martins*, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, situado no Campus de Azurém, Guimarães e assegurado pelos equipamentos existentes no mesmo.

Relativamente ao programa experimental, inicialmente passa por avaliar a trabalhabilidade dos betões produzidos no estado fresco, propriedade fundamental para distinguir betões com diferentes aplicações e classificar os mesmos. A sua caracterização irá ser realizada através dos ensaios espalhamento para avaliar a fluidez, complementados pelos ensaios L-Box, Funil-V e J-Ring necessários para avaliar a sua viscosidade e capacidade de passagem por entre as armaduras do betão, características importantes para a classificação de um betão autocompactável.

Posteriormente e no estado endurecido, pretende-se avaliar a resistência mecânica a diferentes idades de cura através de ensaios de resistência à compressão e à tracção por compressão diametral. Quanto á sua durabilidade, esta irá ser avaliada por intermédio da realização de

ensaios de absorção de água por capilaridade e imersão (à pressão atmosférica), bem como, pela sua resistência à penetração de cloretos, resistividade eléctrica e carbonatação.

1.3. Organização da Dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos, que em seguida são pormenorizados:

- **Capítulo 1:** O presente capítulo procura enquadrar o tema em estudo, servindo de iniciação às temáticas a abordar, descrevendo também a organização das várias partes do trabalho de investigação.
- **Capítulo 2:** Aborda o estado actual do conhecimento sobre a indústria do betão e impactos ambientais que estão associados, bem como, o caminho a seguir para a redução de tais impactos, abordando a temática dos betões com elevados teores de substituição de cimento por adições minerais e o seu contributo para a minimização dos mesmos.
- **Capítulo 3:** Fundamenta-se a campanha experimental, para além, da caracterização dos materiais seleccionados e composições a estudar. É descrito cada um dos ensaios a realizar, bem como, alguns fundamentos teóricos.
- **Capítulo 4:** São apresentados e analisados os resultados obtidos na campanha experimental, para os diversos ensaios. Procura-se explorar e comparar as particularidades dos resultados obtidos em cada uma das composições a estudar.
- **Capítulo 5:** Procura-se sistematizar as principais conclusões observadas ao longo desta dissertação, para além, de se enunciar algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros relativos à área em estudo.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. Sustentabilidade da Indústria Cimenteira e do Betão

O sector da construção desempenha um papel importante no sentido de contribuir para um futuro mais sustentável, uma vez que é um dos maiores e mais activos sectores da indústria, representando cerca de 25% da produção industrial europeia. É por isso, também responsável por elevados impactos ambientais, destacando-se a continua extracção de matérias-primas não renováveis, cifrando-se o seu consumo nas 3000 milhões de toneladas por ano, bem como, elevados consumos energéticos e consequentes emissões de gases com efeito de estufa, o que evidencia um sector claramente insustentável.

A indústria cimenteira destaca-se claramente como uma das maiores responsáveis pelos elevados impactos ambientais que estão associados ao sector da construção, visto o cimento ser, essencialmente usado no fabrico de betão, que por sua vez, é o material de construção mais consumido pelo Homem. Actualmente, fruto de um ritmo de construção desenfreado e prazos de construção cada vez mais curtos, o que leva a muitos desperdícios, a produção anual de cimento cifra-se nos 2800 milhões de toneladas. Estima-se que este valor possa variar entre as 3690 e as 4380 milhões de toneladas em 2050, dependendo do cenário de crescimento económico, ficando a dever-se sobretudo, países como a China e a Índia, cujas economias crescem a um ritmo quase meteórico, bem como, outros países e regiões em desenvolvimento situadas especialmente nos continentes Asiático e Africano (Figura 1).

A produção de cimento Portland, material ligante mais utilizado na indústria da construção, acarreta uma pegada ecológica elevada, visto cada tonelada produzida ser responsável pela libertação de uma tonelada de CO₂ para a atmosfera, estimando-se que por si só a indústria do cimento seja responsável por cerca de 7% de todo o CO₂ produzido a nível mundial. A isto, acresce-se o uso de matérias-primas não renováveis (argilas e calcários) para além do uso de enormes quantidades de água e de um consumo elevadíssimo de energia para a sua produção, cifrando-se este na ordem dos 5 GJ por tonelada de cimento produzida, apenas superado pela produção de alumínio e de aço.

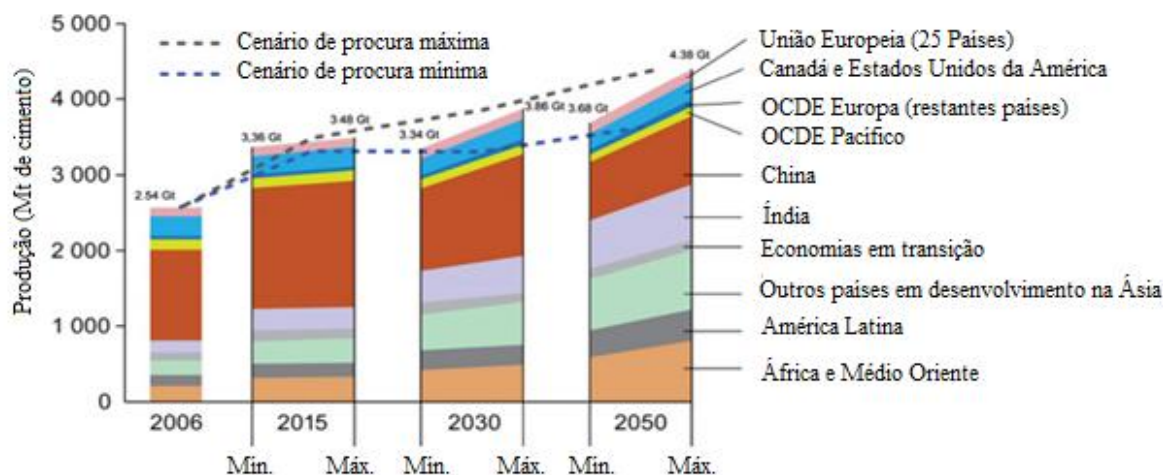


Figura 1- Previsão futura do consumo mundial de cimento (IEA, 2009)

Estes elevados impactos ficam a dever-se em parte à produção de clínquer, que é obtido a partir da cozedura do calcário e argila a temperaturas superiores a 1450°C e representa cerca de 95% da composição do cimento de Portland. Taylor et al. (2006), referem que a produção de clínquer é o principal consumidor de energia no processo de fabricação do cimento, representando entre 20 a 40% dos custos totais de produção, sendo a maior parte da energia utilizada na forma de combustível para a produção de clínquer e electricidade para a trituração das matérias-primas.

Em a “Sustentabilidade dos Materiais de Construção” Torgal & Jalali (2010), também abordam esta temática, referindo que a produção de clínquer de cimento é a primeira causa responsável pelo fraco desempenho ambiental do ligante fabricado a partir do clínquer, resultando daqui que os betões contendo cimento com baixo teor de clínquer ou aqueles em que haja substituição parcial de cimento Portland por materiais com características pozolânicas ou hidráulicas constituem uma opção ambientalmente mais sustentável (Metha, 2001; Roscovic & Bjegovic, 2005).

A produção de energia necessária à transformação do clínquer também é responsável pela elevada pegada ecológica associada a esta indústria, sobretudo devido às emissões de carbono e uso de combustíveis fósseis, como o carvão e petróleo. Sendo, as energias renováveis, um dos caminhos a seguir rumo a sustentabilidade energética, a aposta nestas energias ainda não está massificada, sendo as centrais termoeléctricas e nucleares as principais fontes de obtenção de energia.

Assim, diminuir o impacto causado pelo uso de combustíveis fósseis nas centrais termoelétricas, afigura-se como uma prioridade, nomeadamente, no reaproveitamento de resíduos e subprodutos industriais produzidos pela combustão do carvão como cinzas volantes e escórias, que de outro modo serão armazenadas em aterro, reduzindo assim os impactos ambientais inerentes. Em Portugal apenas existem em funcionamento duas centrais termoelétricas, situadas em Sines e no Pego, sendo que em 2008 a produção de cinzas volantes em Portugal atingiu as 500 mil toneladas. Segundo a Tejo Energia, responsável pela central do Pego, os principais combustíveis consumidos pela central para a produção de energia são o carvão e o fuelóleo. Em 2010, o consumo de carvão rondou as 682 mil toneladas, verificando-se que este consumo tem vindo a diminuir ao longo dos últimos anos (Quadro 1).

Quadro 1 - Consumo anual de combustíveis fósseis na central termoelétrica do Pego (Tejo Energia, 2010)

Combustíveis consumidos	2006	2007	2008	2009	2010
Carvão (kt)	1669	1376	1361	1214	682
Consumo específico de carvão (t/GWh)	353	353	357	357	366
Fuelóleo (kt)	10	4,3	6,9	12	7,8
Consumo específico de fuelóleo (t/GWh)	2,1	1,1	1,8	3,4	4,2

As 682 mil toneladas de carvão consumidas em 2010 deram origem a 64 mil toneladas de cinzas volantes das quais cerca de 91% foram reutilizadas na indústria do cimento e do betão, bem como as escórias, cuja reutilização rondou os 32% cifrando-se nas 29 mil toneladas (Quadro 2).

Já a nível mundial a produção de cinzas de carvão é estimada em mais de 1200 milhões de toneladas por ano, das quais pelo menos 75% são cinzas volantes, que são adequadas e podem ser usadas como adição pozzolânica em betões e outros produtos de cimento, sendo que apenas 20% das mesma é utilizada de cimento e de betão (Camões, 2006).

Estima-se também que a produção anual de cinzas volantes continue a aumentar e, possa atingir os 2000 milhões de toneladas por ano em 2020, sendo fundamental aumentar a percentagem de reutilização das mesmas.

Quadro 2 - Produção anual de cinzas volantes na central termoelétrica do Pego (Tejo Energia, 2010)

Cinzas volantes produzidas	2006	2007	2008	2009	2010
Totalidade de cinzas produzidas (kt)	168	140	152	154	64
Quantidade específica (t/GWh)	36	36	40	45	35
Cinzas depositadas em aterro (%)	10	7	9	25	9
Cinzas utilizadas na indústria (%)	90	93	91	75	91

Neste sentido e, pelos motivos descritos anteriormente, é necessário aumentar o conhecimento em relação à correcta utilização do cimento e respectiva racionalização, através da utilização de misturas cada vez mais eficientes. A redução do rácio clínquer/cimento, através do uso de betões com quantidades de cimento de Portland reduzidas, substituindo-o por adições minerais, em especial as resultantes de subprodutos industriais capazes de originar betões mais duráveis e, o uso de agregados reciclados em vez de matérias-primas não renováveis deve ser encorajado por forma a tornar o futuro desta indústria mais sustentável.

2.2. Adições Minerais

A partir de meados do século XX, o uso de adições minerais no fabrico de cimentos compostos, passou a ser uma realidade, para isso muito contribuiu a consciencialização geral para o problema do aquecimento global, bem como, o desenvolvimento tecnológico (aparecimento de adjuvantes) associado à necessidade de reduzir os custos de produção do cimento Portland. Sabendo que a durabilidade de infra-estruturas de betão fabricadas a partir de cimento Portland é questionável, existem cada vez mais pressões para o uso crescente de cimentos compostos, capazes de responder adequadamente e de forma mais eficaz, aos vários parâmetros de desempenho que lhe são exigidos. O documento normativo NP EN 197-1 (2001) que rege os diferentes tipos de cimentos, prevê a possibilidade de substituição parcial do clínquer por subprodutos de características pozolânicas e cimentícias, conforme demonstra o quadro seguinte (Quadro 3).

Quadro 3 – Tipos de cimentos (adaptado da norma NP EN 197-1).

Tipos de cimentos principais	Constituintes
CEM I – Cimento Portland	Clínquer 95-100 %
CEM II – Cimento Portland Composto	Clínquer > 65%
CEM III – Cimento de Alto Forno	Clínquer + 35-95% de escórias de alto forno
CEM IV – Cimento Pozolânico	Clínquer 45% a 89% + 11% a 55% de sílica de fumo, pozolana ou cinzas volantes
CEM V – Cimento Composto	Clínquer > 20% + escória >18% + pozolana e/ou cinzas volantes siliciosas

As adições minerais são, materiais siliciosos finamente divididos e posteriormente adicionados ao betão em quantidades relativamente elevadas, sendo estas, em geral, na ordem do 20 a 70% da massa do material cimentício (Metha & Monteiro, 2006). Estas podem ser usadas para alcançar propriedades especiais no betão, bem como, melhorar certas propriedades que lhe são inerentes, tais como, a resistência à compressão através da redução do calor de hidratação, a trabalhabilidade e a durabilidade. Para além destes factores, as adições contribuem para a sustentabilidade e redução dos impactos ambientais associados à indústria do betão, nomeadamente através da reutilização de subprodutos industriais em substituição parcial do cimento, reduzindo assim a energia e poluição incorporada no betão.

O documento normativo NP EN 206-1 (2005), referente às especificações técnicas do betão, refere que as adições minerais podem ser classificadas em dois tipos, de acordo com a sua capacidade reactiva com a água:

- **Tipo I:** Adição quase inerte;
- **Tipo II:** Adição pozolânica ou hidráulica latente.

Esta dissertação irá dar especial enfoque às adições pozolânicas (tipo II), nomeadamente as cinzas volantes, o metacaulino e a cal hidratada, sendo as suas propriedades descritas nos subcapítulos seguintes.

2.2.1. Materiais Pozolânicos

As pozolanas são materiais sílico-aluminosos, que por si só, possuem poucas ou nenhuma propriedade aglomerantes e hidráulicas mas, quando finamente divididos e na presença de água têm a capacidade de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas ambiente, originando compostos com características de hidraulicidade e propriedades aglomerantes. Estas possuem ainda alguma cal e um pouco de óxido de ferro contudo, estes encontram-se em quantidades insuficientes para que tenham características de hidraulicidade. Os principais compostos formados pela reacção pozolânica são o silicoaluminato bicálcico hidratado, os silicatos de cálcio hidratados (CSH) e os aluminatos de cálcio hidratados (Papadakis et al., 1992).

Segundo Metha & Monteiro (2006), as pozolanas podem ser classificadas de acordo com a sua origem, em dois grupos:

- **Naturais:** materiais processados com o intuito de originar uma pozolana. Normalmente o processamento envolve esmagamento, moagem e separação de tamanho, sendo que em alguns casos pode também envolver activação térmica.
- **Subprodutos:** materiais que não são os produtos primários das indústrias que os produzem. Estes subprodutos industriais podem ou não ser processados, antes de serem usados como adição.

Torgal & Jalali (2010) referem, em “A Sustentabilidade dos Materiais de Construção” que a reactividade pozolânica, isto é, a capacidade de o material se combinar com o hidróxido de cálcio é, uma propriedade bastante complexa e que está dependente da sílica e alumina não se apresentarem num elevado grau de cristalinidade (Gjorv, 1992; Liu, 1998). Pode-se então dizer, que a estrutura interna do material está directamente ligada à sua reactividade, sendo esta, tanto maior quanto menos cristalina for a sílica e a alumina.

A reacção pozolânica ocorre entre a superfície da pozolana e o reagente, logo o grau da reacção vai ser influenciado pelo estado da superfície da pozolana. Assim, a superfície da pozolana que vai reagir com o hidróxido de cálcio, deve ser o maior possível, de modo a que se obtenha um grau de reacção elevado.

É natural portanto, que a utilização de pozolanas com elevadas superfícies específicas seja usual, sendo que, Coutinho (1988) refere para valor mínimo de superfície específica de Blaine $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, sendo no entanto desejável valores entre 6000 e $10000 \text{ cm}^2/\text{g}$.

A vantagem de se usarem pozolanas, nomeadamente cimentos pozolânicos, fica-se a dever sobretudo a algumas características importantes da reacção pozolânica. Metha & Monteiro (2006) referem que, em primeiro lugar trata-se de uma reacção lenta, como tal, as taxas de desenvolvimento de calor e resistência serão mais lentos. A reacção é também consumidora de cal em vez de produtora de cal, o que tem uma influência importante na durabilidade da pasta hidratada em ambientes ácidos. Outro aspecto importante referido é o facto de a reacção ser muito eficiente no que diz respeito ao preenchimento de espaços capilares, melhorando assim a resistência e a impermeabilidade.

Assim, a capacidade que as pozolanas têm em reagirem com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, justifica o seu uso no fabrico de betões, dando um contributo importante em termos de durabilidade e resistência.

2.2.1.1. Cinzas Volantes

As propriedades cimentícias das cinzas volantes já são conhecidas à algumas décadas, contudo a sua utilização tornou-se mais frequente depois de terem sido adoptados regulamentos, que obrigaram as centrais termoeléctricas a instalar purificadores e precipitadores electrostáticos para reter as partículas finas que anteriormente iam directamente para a atmosfera.

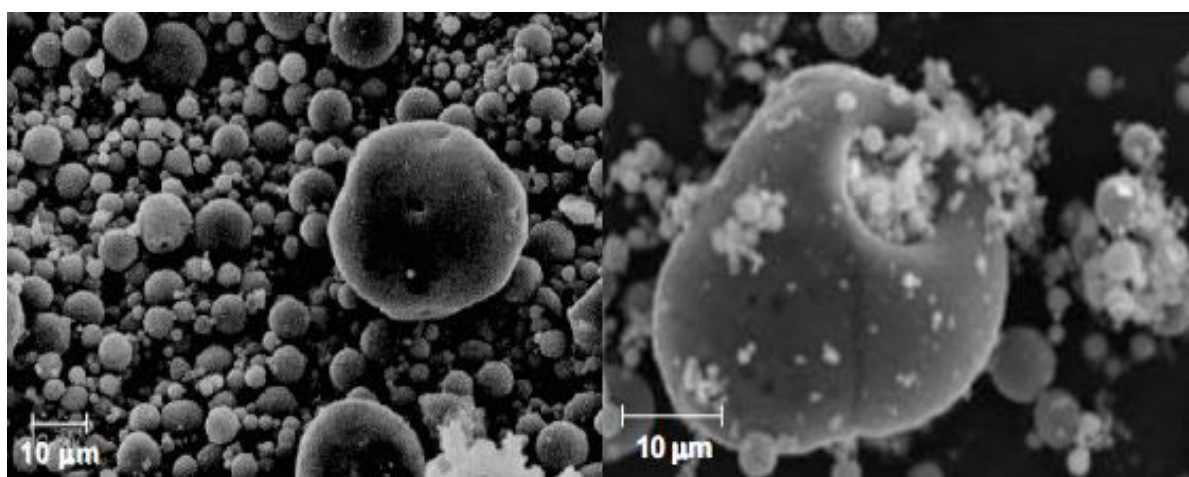
Como já foi dito anteriormente, as cinzas volantes resultam da combustão do carvão nas centrais termoeléctricas. Estas são obtidas por precipitação electrostática ou mecânica das poeiras arrastadas dos gases de combustão da queima de antracites ou carvões betuminosos pulverizados (Camões, 2002).

As cinzas volantes são uma adição pozolânica, tipo II e sendo estas provenientes de um subproduto industrial têm uma grande disponibilidade no mercado a um custo inferior ao cimento Portland, podendo assim ser aproveitadas como substituição parcial do cimento no

fabrico de betão, reduzindo o custo associado a este componente. À medida que a sua utilização se foi generalizando, também se foram evidenciando as vantagens do emprego deste componente, e verificou-se a melhoria de certas propriedades do betão, nomeadamente a trabalhabilidade, redução do calor de hidratação, a redução da permeabilidade e consequente melhoria da durabilidade (Camões, 2002).

Segundo a norma portuguesa e europeia NP EN 450-1 (2006), as cinzas volantes são caracterizadas como sendo um pó fino constituído principalmente por partículas vítreas de forma esférica resultante da queima de carvão pulverizado, com ou sem materiais de co-combustão, possuindo propriedades pozolânicas e constituídas essencialmente por SiO_2 e Al_2O_3 , contendo no mínimo 25% em massa de SiO_2 reactivo.

Como já foi referido, as partículas das cinzas volantes apresentam uma forma esférica podendo-se dividir em dois tipos, sólidas e ocas (cenosferas ou plerosferas – Figura 2) e são essencialmente vítreas (cerca de 80%) e de finura elevada (Camões, 2002). Estudos referem que as partículas de cinzas volantes variam geralmente entre menos de 1 μm e 100 μm de diâmetro, sendo que cerca 50% em massa têm menos de 20 μm de diâmetro (Metha & Monteiro, 2006). Quanto à sua superfície específica de Blaine, esta varia, em geral, de 250 m^2/kg a 550 m^2/kg (Alonso & Wesche, 1991).



a) partículas esféricas - cenosferas

b) plerosferas contendo partículas cenosféricas

Figura 2 - Cinzas volantes (Camões, 2002)

A actividade pozolânica das cinzas volantes está em grande parte ligada à sua finura, é consensual na comunidade científica que maiores finuras conduzem a uma maior actividade pozolânica.

Como a maioria das reacções químicas ocorre mais rapidamente com o aumento da finura das partículas é expectável que a actividade pozolânica de uma cinza volante seja dependente da área disponível para a reacção (Jalali, 1991; Neville, 1995). A forma esférica das partículas é particularmente vantajosa sob o ponto de vista da exigência de água e a elevada superfície específica indica que o material apresenta uma elevada reactividade pozolânica com o hidróxido de cálcio (Neville, 1995).

Os documentos normativos pelos quais são abrangidas as cinzas volantes são as normas portuguesas e europeias NP EN 450-1 e NP EN 450-2, as quais apresentam as especificações exigíveis às cinzas volantes, sendo apresentado no Quadro 4 e Quadro 5, um resumo das suas principais propriedades químicas e físicas respectivamente.

Quadro 4 - Requisitos químicos das cinzas volantes (adaptado da norma NP EN 450-1)

Propriedades	Método de ensaio	Valor característico especificado (em massa)
Perda ao fogo	NP EN 196-2	$\leq 5,0 \%$
Cloretos	NP EN 196-2	$\leq 0,1 \%$
Sulfato	NP EN 196-2	$\leq 3,0 \%$
Óxido de cálcio livre	NP EN 451-1	$\leq 1,0^1 \%$
Óxido de cálcio reactivo	NP EN 197-1	$\leq 10 \%$
Óxido de silício reactivo	NP EN 197-1	$\geq 25^2 \%$
Óxido de silício, óxido de alumínio e óxido de ferro	NP EN 196-2	$\geq 70^2 \%$
Teor total de álcalis	NP EN 196-2	$\leq 5,0^2 \%$
Óxido de magnésio	NP EN 196-2	$\leq 4,0 \%$

1 – Pode atingir 2.5% desde que estejam em conformidade com os requisitos da expansibilidade

2 – As cinzas volantes obtidas por combustão do carvão pulverizado são consideradas com satisfazendo este requisito

Quadro 5 - Requisitos físicos das cinzas volantes (adaptado da norma NP EN 450-1)

Propriedades	Método de ensaio	Valor característico especificado
Finura	NP EN 451-2	$\leq 40 \%$
Índice de actividade	NP EN 196-1	$\geq 75 \%$ (28 dias) $\geq 85\%$ (90 dias)
Expansibilidade	NP EN 196-3	$\leq 10 \text{ mm}$
Massa volúmica das partículas	NP EN 196-6	valor médio declarado pelo produtor $\pm 200 \text{ kg/m}^3$
Tempo de início de presa ¹	NP EN 196-3	\leq duas vezes o tempo de início de presa dum pasta de cimento com 100% de cimento de referência

1 – Só as cinzas volantes obtidas por combustão de carvão pulverizado são supostas satisfazer este requisito

A composição exacta das cinzas volantes é muito variável apresentando diferentes composições e propriedades mineralógicas de acordo com o seu procedimento de produção, diferindo sobretudo no teor de cálcio apresentado. Estas podem ser divididas em dois grupos de acordo com o seu teor em cálcio:

- **Cinzas com reduzido teor em cálcio:** contém um teor em cálcio inferior a 10% e são resultantes em geral da combustão de antracite e carvão betuminoso. Apresentam propriedades pozolânicas contudo não têm propriedades aglomerantes e hidráulicas.
- **Cinzas com elevado teor em cálcio:** contém um teor em cálcio superior a 10%, em geral, situado entre 15-40% e são resultantes da combustão de lenhites ou carvão sub-betuminoso. Possuem propriedades pozolânicas bem com propriedades hidráulicas.

A grande maioria das cinzas volantes produzidas quer em Portugal, quer no resto do mundo, possuem reduzido teor em cálcio. Só recentemente as cinzas com elevado teor de cálcio apareceram no mercado, nomeadamente nos Estados Unidos da América, Canadá, Polónia e Grécia (Malhotra, 1993, 1999).

2.2.1.2. Metacaulino

O metacaulino é material altamente pozolânico de origem argilosa, e como tal, trata-se de uma adição do tipo II. Este é obtido pela cozedura do caulino (argila muito refractária) a elevadas temperaturas, na ordem dos 700-900 °C, sendo as suas propriedades dependentes da composição química e mineralógica do caulino de origem, bem como, do seu processo de moagem responsável pela sua maior ou menor finura. A transformação química do caulino em metacaulino pode ser descrita de acordo com a seguinte reacção:



A utilização de argilas calcinadas, na forma de metacaulino, como adição pozolânica em argamassa e betões, tem sido alvo de um interesse considerável nos últimos anos. Grande parte deste interesse prende-se com o facto de o metacaulino conseguir remover o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, o qual está associado a uma fraca durabilidade. A sílica e alumina presentes no metacaulino numa forma activa iram, reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água, promovendo assim a sua remoção e respectiva melhoria da durabilidade. Ao serem adicionadas ao betão as pozolanas vão reagir com a fase solúvel de Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que constitui 20 a 25% do volume de sólidos da pasta de cimento hidratada, originando novos compostos insolúveis de silicatos de cálcio hidratados e consumindo a fase de hidróxido de cálcio conhecida pela sua reduzida durabilidade (Wild & Khatib, 1997). Turanli et al. (2005) referem o consumo de quase 74% da fase de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em pastas de cimento com 55% de metacaulino. Outros autores (Oliveira et al., 2005; Barbhuiya et al., 2009) confirmam a elevada reactividade do metacaulino na presença do hidróxido de cálcio, referindo que esta pozolana é particularmente indicada para a produção de betões mais sustentáveis.

O metacaulino constitui uma fase de transição pouco cristalizada obtida por calcinação de caulino e cuja activação pozolânica pelo hidróxido de cálcio fornece produtos de composição e estrutura similares aos produzidos com cimento de Portland (Ambroise, et al, 1994). A sua reactividade pozolânica depende da sua cristalinidade de origem, da sua granulometria e do grau de amorfização (Sampaio et al, 2001).

Sampaio et al (2001) referem, que o estudo de argilitos, demonstrou que apesar de alguns problemas relacionados com a calcinação devido à presença de carbonatos, as argilas contendo cerca de 20% de caulinite, têm uma grande possibilidade de se tornarem em materiais pozolânicos, sendo que o seu desempenho dependerá muito do tipo de cimento utilizado. A eficácia deste material pozolânico é tanto maior, quanto maior for, a complementaridade da sua granulometria com a do cimento usado para além do diferencial em termos de forças electrostáticas entre as partículas.

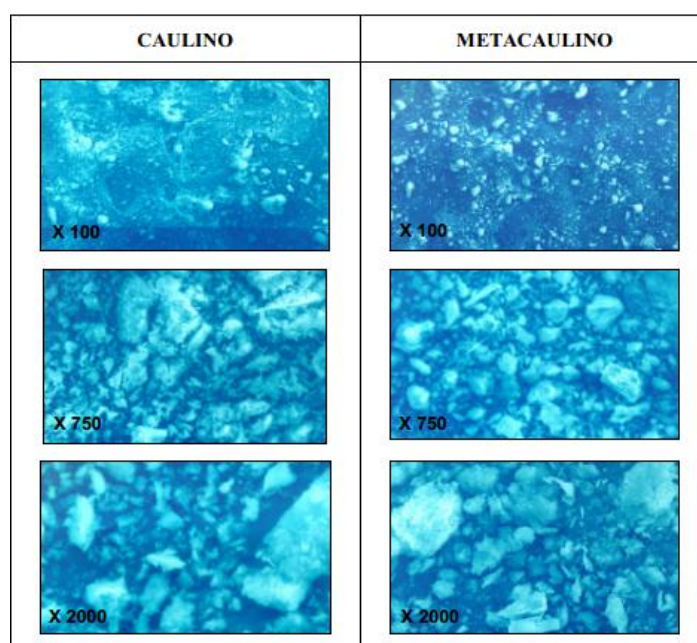


Figura 3 - Fotografias de caulino e caulino incinerado (metacaulino) obtido por microscopia electrónica de varrimento (Sampaio et al., 2001)

O estudo de diferentes ligantes cimento/metacaulino demonstrou que para além da quase eliminação do hidróxido de cálcio da matriz cimentícia, se verificou uma hidratação mais completa dos compostos anidros do cimento com formação de uma rede porosa mais fechada, isto é, constituída por poros de menor diâmetro (Sampaio et al, 2001).

As principais razões para o uso de pozolanas à base de argilas em betões e argamassas, prende-se com a disponibilidade da matéria-prima e mais importante ainda, com o melhoramento da durabilidade que é proporcionado. Além destes factos, dependendo da temperatura de calcinação e tipo de argila, é também possível obter melhoramentos na resistência, especialmente durante as idades iniciais de cura.

2.2.1.3. Cal Hidratada

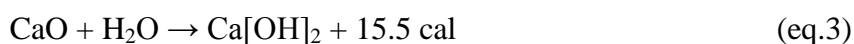
Um dos ligantes artificiais mais antigos resulta da calcinação de rochas calcárias, constituídas sobretudo por carbonato de cálcio (CaCO_3), a aproximadamente $850\text{ }^\circ\text{C}$. A rocha calcária pode-se apresentar sob diversas variedades resultantes da natureza da matéria-prima que a compõe e do processamento utilizado.

As rochas calcárias podem ser classificadas de acordo com a quantidade de impurezas que lhe estão associadas, nomeadamente, quanto à quantidade de argila presente nas mesmas. Ora se a quantidade de argila presente na sua composição for inferior a 50% estamos perante um calcário margoso. No caso de a quantidade de argila ser superior a 50% ficamos na presença de uma magra calcária. No entanto, a quantidade de argila presente na rocha calcária pode ser muito reduzida podendo as rochas calcárias serem quase puras. Assim, os calcários podem ser muito puros ou conterem quantidades variáveis de argila (Coutinho, 1988).

A cal hidratada como foi dito provém da calcinação da pedra calcária, podendo a reacção química ocorrida ser descrita da seguinte forma:



A reacção ocorrida é uma reacção endotérmica, sendo que seguidamente dá-se uma hidratação do óxido de cálcio (CaO), como descreve a seguinte equação química (3):



Ao contrário da primeira reacção que era de origem endotérmica, a hidratação do óxido de cálcio é uma reacção exotérmica e portanto uma reacção espontânea. O endurecimento da cal aérea faz-se ao ar por recarbonatação e temos como produtos finais a pedra originária e água (Aguiar, 2007).

Dos processos anteriores resulta então a cal hidratada ou aérea. É portanto, um ligante constituído sobretudo por óxidos de cálcio ou hidróxidos de cálcio, que endurece lentamente

ao ar por reacção com o dióxido de carbono. Em geral não endurece na água pois não possuem propriedades hidráulicas (NP EN 459-1, 2002).

As cais aéreas ou hidratadas podem ser classificadas quanto ao seu teor de impurezas. Se cal aérea derivar de uma pedra calcária pura, ou seja, com teores de carbonato não inferior a 99%, obtemos uma cal aérea gorda. Estas são de cor branca e possuem propriedades plásticas, pois trata-se de uma cal facilmente trabalhável e bastante macia. No caso da pedra calcária possuir teores de argila compreendidos entre 1 e 5%, a calcinação da mesma, dá origem a uma cal aérea magra. Ao contrário das cais aéreas gordas, as cais aéreas magras são de cor acinzentada e não são tão facilmente trabalháveis, nem tão macias. Apesar das diferenças entre ambas, a reacção de presa é a mesma para qualquer delas.

A cal hidratada, além de ser um ligante aéreo, apresenta elevada alcalinidade, com elevado teor de óxido de cálcio, possibilitando o seu emprego em betões com altos teores de substituição de cimento por adições minerais. A sua finalidade é prover hidróxido de cálcio para as reacções pozolânicas e ainda restabelecer a reserva alcalina do betão, a qual sofre uma decréscimo variável dependendo da reactividade e teor de cada adição (Filho, 2002).

A cal hidratada ao reter água, diminui a disponibilidade desta para a hidratação do cimento, resultando numa microestrutura mais compacta, com partículas anidras de cimento que, com a libertação progressiva da água, retida pela cal, ao longo do tempo, o que propiciará uma cura interna do betão. O refinamento do tamanho dos grãos dar-se-á nas partículas de hidróxido de cálcio, oriundos da hidratação do cimento e da cal hidratada, reforçando a estrutura cristalina do C-S-H, mantendo a reserva alcalina, actuando como preenchimento dos poros, através do efeito fíller. Isto atribui vantagens físicas ao betão, através da diminuição dos coeficientes da permeabilidade e absorção capilar, bem como, um incremento na resistência à compressão (Filho, 2002).

2.3. Betões com Elevados Teores de Cinzas Volantes

O acréscimo substancial do volume de construção das últimas décadas e a insuficiente durabilidade de um número elevado de estruturas de betão armado provocou uma apreciável diminuição de recursos naturais não renováveis (Camões, 2009). A necessidade de diminuir o consumo de cimento Portland, cuja produção é responsável por elevados impactos ambientais, aliada à necessidade de melhorar a durabilidade dos betões produzidos a partir deste, levou os investigadores a estudarem alternativas que mitiguem estes aspectos.

As conhecidas propriedades pozolânicas das cinzas volantes, principal subproduto das centrais termoelétricas, fizeram delas um material pozolânico bem aceite para o fabrico de cimentos compostos, bem como, para serem usadas como adições minerais nos betões. Na prática comercial, a dosagem de cinzas volantes encontra-se limitada de 15 a 20% da massa do total da massa cimentícia. Normalmente, esta quantidade traz benefícios à trabalhabilidade mas, pode não ser suficiente para melhorar a sua durabilidade aos ataques dos sulfatos, à retracção térmica e à expansão devida à reacção álcalis-sílica (Metha, 2004). Com este propósito, estão a ser usadas maiores quantidades de cinzas volantes, estando estas na ordem dos 25 a 35% da massa cimentícia total.

Para Metha (2004), percentagens de substituição na ordem dos 25 a 35% não são suficientes para se poder classificar a mistura como um betão com elevado teor de cinzas volantes. A partir das suas considerações teóricas e experiências práticas, Metha e Malhotra (2002), determinaram que, com percentagens de substituição não inferiores a 50%, é possível obter betões sustentáveis e de alto desempenho, possuindo elevada trabalhabilidade, bem como, elevada resistência final e alta durabilidade. Contudo, para se alcançarem as propriedades referidas, a utilização de superplastificantes é quase inevitável em betões com elevados teores de cinzas volantes (Aggarwal et al., 2010).

Para Malhotra & Metha (2002), um betão com elevado teor de cinzas volantes pode ser caracterizado por:

- Possuir um teor de cinzas volantes não inferior a 50% da massa cimentícia total;
- Baixo teor de água, geralmente inferior a 130 L/m³;

- Teor de cimento não superior a 200 kg/m^3 , geralmente próximo de 150 kg/m^3 ;
- Baixa razão água/ligante, normalmente inferior a 0.35.

Sumer (2012) refere que o principal papel das cinzas volantes em betões pode ser dividido em três aspectos, vulgarmente denominados de efeito morfológico, efeito pozolânico e efeito micro-agregado. O efeito morfológico das cinzas volantes prende-se com o facto de existirem muitas partículas de dimensão microscópica nas cinzas volantes que actuam como “bolas de lubrificação” quando no estado fresco, beneficiando por isso, a sua fluidez. Essas mesmas partículas, também têm influência no efeito micro-agregado, uma vez que estas conseguem dispersar-se facilmente pela mistura e combinar-se firmemente com o gel produzido na hidratação do cimento e assim promover a compacidade da mistura. Já o efeito pozolânico, é o principal ponto forte da adição de cinzas volantes, isto porque, os óxidos de alumínio (Al_2O_3) e de silício (SiO_2) livres presentes nas cinzas podem ser activados pelo hidróxido de cálcio, produto resultante da hidratação do cimento, e produzir mais gel hidratado. Sendo que o gel produzido é muito eficiente no que diz respeito ao preenchimento dos espaços capilares, contribui assim de forma efectiva para o aumento da resistência e impermeabilidade.

Contudo, as cinzas volantes são pozolanas pouco reactivas, estando por isso associadas a fenómenos de hidratação lentos contribuindo muito pouco para o desenvolvimento da resistência de curto prazo dos betões (McCarthy & Dhir, 1999, 2004; Boukni et al., 2009). Jiang et al. (2004) analisaram o desempenho de betões com volumes de substituição de 40% e 60% de cimento por cinzas volantes, confirmando as referidas perdas de resistência para as idades iniciais, sendo que os mesmos autores referem que para 118 dias de cura os betões com 40% de cinzas apresentam uma resistência superior aos betões sem cinzas volantes.

Camões (2002), fazendo variar a quantidade de ligante (400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 e 600 kg/m^3), comprovou que a incorporação de 60% de cinzas volantes com reduzido teor de cálcio, permite obter betões económicos e de elevado desempenho, utilizando para o efeito cimento Portland 42.5R e superplastificantes de 3ª geração, os quais permitiram obter razões água/ligante abaixo de 0,3. Como se pode constatar na Figura 4, mesmo aos 28 dias de cura, para uma composição com apenas 160 kg de cimento (400 kg/m^3 de ligante) é possível obter resistências na ordem dos 35 MPa , comprovando assim a eficiência do reaproveitamento de subprodutos pozolânicos em volumes apreciáveis.

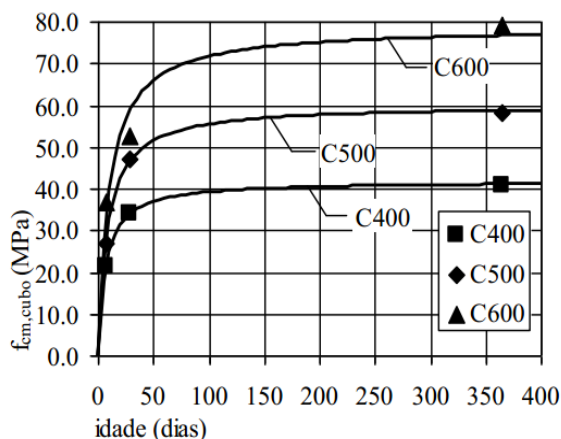


Figura 4 - Evolução com o tempo da resistência à compressão de betões com cimento Portland e cinzas volantes, 40% e 60% respectivamente (Camões, 2002)

A resistência à compressão deste tipo de betão está dependente do tipo de materiais e das proporções utilizadas, mas é possível generalizar que é possível fabricar betões com elevados teores de cinzas que apresentam aos 28 dias resistências próximas de 35 MPa e aos 91 dias de cerca de 45 MPa (Burden, 2006).

Durán-Herrera et al. (2010) analisaram o desempenho de betões fabricados com cimento pozolânico, com adições de cinzas volantes entre 15 e 75%, verificando que para todas as idades de cura (1, 3, 7, 14, 21, 28, 56 dias) à medida que a quantidade de cinzas volantes aumenta, a resistência à compressão diminui. Contudo, também verificou que, com o aumento do tempo de cura a diferença entre a resistência do betão de referência e do betão com cinzas tende a diminuir, fruto da actividade pozolânica.

Segundo o mesmo autor, na prática, a resistência à compressão do betão é especificada aos 28 dias. Neste contexto, a Figura 5 ilustra a vasta gama de resistências à compressão aos 28 dias possíveis para diferentes percentagens de substituição de cimento por cinzas volantes, verificando-se que, para razões água/ligante de 0.5, 0.55 e 0.6 podem-se obter resistências de 5 MPa a 45 MPa. Já na Figura 6 ilustra-se a gama de resistências aos 56 dias, com gamas de resistência entre 7 MPa e 47 MPa.

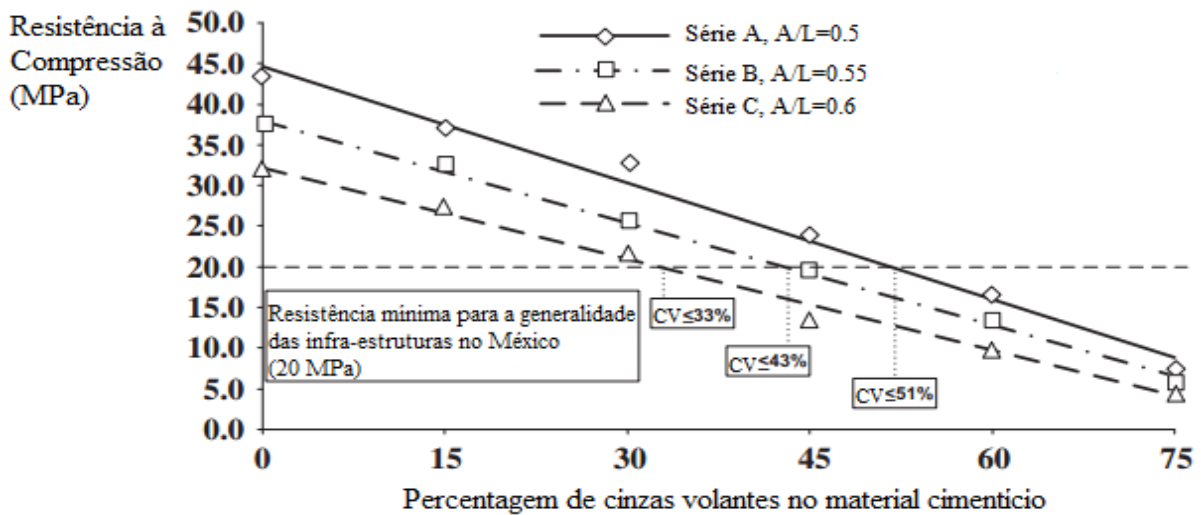


Figura 5 - Resistência à compressão aos 28 dias para diferentes porcentagens de cinzas volantes (adaptado de Durán-Herrera et al. (2010))

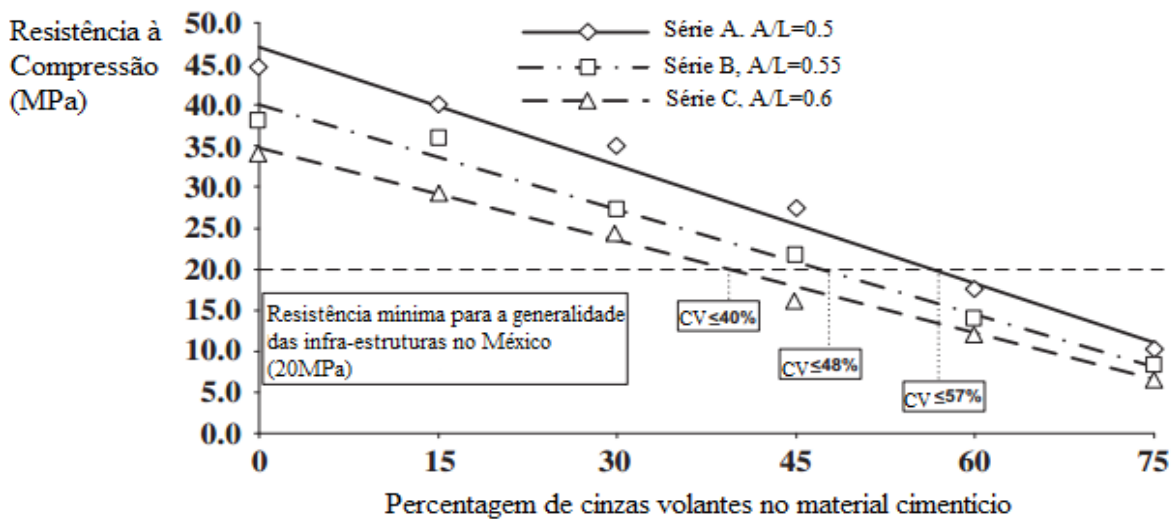


Figura 6 - Resistência à compressão aos 56 dias para diferentes porcentagens de cinzas volantes (adaptado de Durán-Herrera et al. (2010))

As proporções dos materiais a usar nas misturas pode muito variada, estando dependentes do nível de resistência pretendido. Para Malhotra (2002), as proporções típicas utilizadas no fabrico são indicadas no Quadro 6.

É possível verificar, através da análise do Quadro 6, que a quantidade de água utilizada varia pouco para os diferentes níveis de resistência. Assim, para obtermos níveis superiores de resistência é necessário aumentar a quantidade de material cimentício consideravelmente, bem como, utilizar superplastificantes para conseguir obter uma razão água/ligante baixa.

Quadro 6 - Proporções típicas das misturas para diferentes resistências (Malhotra, 2002)

Nível de Resistência (MPa)	Baixo	Médio	Alto
28 dias	20	30	40
90 dias até 1 ano	40	50	60
Proporção dos Materiais (kg/m ³)	Baixo	Médio	Alto
Água	120-130	115-125	100-120
Cimento	100-130	150-160	180-200
Cinza Volante	125-150	180-200	200-225
Água / Ligante	0,40-0,45	0,33-0,35	0,30-0,32
Agregado Grosso	1100-1200	1100-1200	1100-1200
Agregado Fino	800-900	800-900	800-900

As centrais termoelétricas modernas permitem-nos obter cinzas volantes de elevada finura e com baixo teor de carbono, que quando usadas em grande quantidade, são capazes de proporcionar excelente trabalhabilidade ao betão com um teor de água que é 15 a 20% menor que o de um betão corrente.

A utilização de uma grande quantidade das cinzas volantes em betões é acompanhada de vários benefícios, sendo o mais atractivo de todos, provavelmente, a sua durabilidade. Vários autores afirmam que estes betões possuem uma reduzida permeabilidade ao gás e à água, reduzida absorção capilar, elevada resistência à penetração de cloretos, baixo calor de hidratação e reduzida retracção por secagem (Burden, 2006; Camões, 2006; Malhotra & Metha, 2002). Suvimol Sujjavanich et al. (2005) referem que os betões com elevados volumes de cinzas têm menor permeabilidade aos cloretos e têm tendência para minimizar, ou mesmo anular o risco de corrosão. Metha (2004) refere por sua vez que, a adição de grandes volumes de cinzas, reduz a exigência de água, melhora a trabalhabilidade, minimiza a fissuração associada à retracção térmica e à de secagem, aumenta a resistência à corrosão das armaduras e ao ataque por sulfatos.

Apesar de todas as vantagens aparentes, estes betões também possuem alguns inconvenientes. Geralmente, o desenvolvimento de resistências é mais lento nos betões com elevados volumes de cinzas quando comparados com os betões correntes. Contudo, e embora as resistências nas idades iniciais sejam, usualmente, menores que as dos betões correntes, as propriedades

pozolânicas das cinzas resultam em resistências a longo termo comparáveis ou mesmo melhores que as dos betões correntes (Crouch et al., 2007).

Outro aspecto menos positivo deste tipo de betão está relacionado com a profundidade de penetração devida à carbonatação, que aumenta com o acréscimo do teor de cinzas volantes (Burden, 2006; Jiang, Lin & Cai (2000), isto porque a taxa de carbonatação é função, entre outros, da massa de hidróxido de cálcio disponível para a reacção (Burden, 2006; Joshi & Lothia, 1997).

Um bom entendimento dos mecanismos devido aos quais as cinzas volantes melhoram o desempenho reológico do betão em estado fresco, bem como, as resistências finais e a sua durabilidade no estado endurecido é de enorme importância no sentido de assegurar que os potenciais benefícios dos betões com elevados teores de cinzas são plenamente alcançados (Metha, 2004).

2.4. Betão Auto-Compactável

2.4.1. Generalidades

Como o avançar dos anos e, devido á potencialidade do betão em originar estruturas de formas variadas, a arquitectura das estruturas modernas foi-se tornando, cada vez mais complexa. As estruturas em betão armado são cada vez mais exigentes no que diz respeito às suas formas, as quais são cada vez complexas e densamente armadas, o que torna a colocação do betão em obra um desafio, por vezes, difícil de superar. Sabe-se que a qualidade do betão no seu estado endurecido vai depender em grande parte de uma correcta colocação em obra, ou seja, se a vibração e compactação do mesmo foi bem realizada. Uma deficiente compactação do betão originará uma estrutura com défices de durabilidade, pondo pôr em causa a sua segurança estrutural.

Foi a necessidade de transpor este problema, que levou em 1986, o professor Okamura da Universidade de Tóquio, a iniciar uma serie de estudos no sentido do desenvolvimento de um betão capaz ser colocado em obra sem a necessidade de vibração e compactação. Foi então criado o conceito de Betão Auto-Compactável, em inglês *Self-Compacting Concrete*. A

tecnologia desenvolvida por Okamura, no início da década de 90, já estava desenvolvida ao ponto de ser utilizada no Japão, quer na construção de pontes, quer em estruturas de edifícios. Na Europa, a utilização do betão auto-compactável, também se inicia nos anos 90, contudo ao contrário dos japoneses, era usado sobretudo pela indústria de pré-fabricação.

Segundo o documento “*European Guidelines for Self-Compacting Concrete*”, o betão auto-compactável caracteriza-se por ser um betão que não necessita de vibração para a sua colocação e compactação. Este é capaz de fluir através do seu peso próprio, preenchendo completamente os espaços vazios das cofragens mesmo na presença de zonas densamente povoadas por armaduras, sem a ocorrência de segregação, mantendo a sua homogeneidade.

Segundo os mesmos autores, a trabalhabilidade do betão auto-compactável no estado fresco pode ser caracterizada pelas seguintes propriedades: capacidade de enchimento, resistência à segregação, capacidade de passagem e viscosidade.

Silva & Brito (2009) referem que, desde o início da sua aplicação há um conjunto de factores tem condicionado de algum modo a sua maior implementação, nomeadamente a inexistência de:

- Normalização dos métodos de ensaio e caracterização do betão auto-compactável no estado fresco;
- Métodos de cálculo de amassaduras mais fáceis de implementar e com maior reprodutibilidade;
- Optimização das misturas em termos económicos de modo a tornar a aplicação deste material mais competitivo face aos betões convencionais;
- Avaliação das propriedades dos betões eco-eficientes a longo prazo em termos de durabilidade.

Na procura de respostas a todos estes pontos, a comunidade científica tem procurado contribuir de forma significativa essencialmente através da investigação e da apresentação de resultados, sendo assim possível criar na indústria da construção um clima de confiança sobre a utilização deste novo material (Silva & Brito, 2009). Após os resultados animadores, aos investigadores, juntaram-se também organizações ao nível Europeu (EFNARC, RILEM, entre outras), formando grupos técnicos com objectivo de estudar os betões auto-compactáveis

desde os materiais constituintes até à sua produção e aplicação, passando ainda pela sua durabilidade. Destes grupos técnicos, resultou a publicação de uma série de documentos orientadores sobre a utilização deste tipo de betões, contribuindo assim sobre a falta de regulamentação sobre o tema.

Actualmente, já encontra-se disponível a norma NP EN 206-9 (2010), a qual criou uma série de regras adicionais para o betão auto-compactável. Além dos requisitos descritos na norma NP EN 206-1 (2000), a presente norma estabelece requisitos adicionais para:

- os materiais constituintes do betão auto-compactável;
- as propriedades do betão auto-compactável fresco e endurecido e sua verificação;
- as limitações na composição do betão auto-compactável;
- a especificação do betão auto-compactável;
- os procedimentos do controlo da produção em fábrica;
- os critérios de conformidade.

Estão assim lançadas as bases para uma maior utilização de betão auto-compactável, o que permitirá comparar e validar as misturas produzidas.

Relativamente a um betão convencional e para o mesmo volume de ar e água, a composição de um betão auto-compactável possui maior volume de material fino, menor volume de agregados grossos e necessita da adição de um adjuvante redutor de água de alto desempenho. Na figura 7, pode-se observar a proporção dos diferentes materiais constituintes da mistura de ambos os betões.

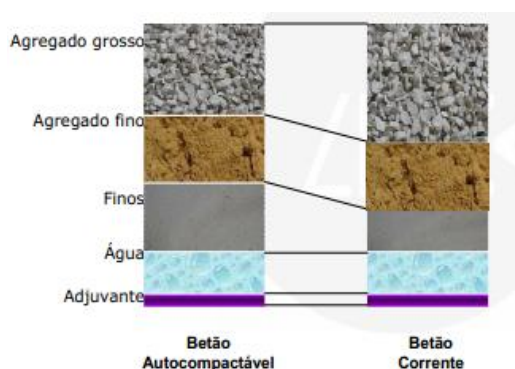


Figura 7 - Comparação da proporção de mistura entre um betão auto-compactável e um betão corrente (Gonçalves, 2006)

Devido a todas a suas potencialidades, o betão auto-compactável é visto como uma tecnologia promissora, tendo na última década sido utilizado em vários países, dos quais se destacam o Japão, Suécia e Holanda.

2.4.2. Vantagens e Inconvenientes

A aplicação do betão auto-compactável, como qualquer outro material, tem os seus pontos positivos, bem como alguns pontos negativos. Em relação as vantagens da aplicação do betão auto-compactável, podem-se destacar as seguintes:

- **Redução do custo de produção:** não é necessário mão-de-obra especializada, para a realização da compactação do betão de modo a assegurar o total preenchimentos das cofragens e envolvimento das armaduras;
- **Redução do período de construção:** visto não ser necessário realizar a compactação do betão, o processo de betonagem torna-se mais rápido. Permite betonar todos os elementos de uma forma contínua, sem necessidade de se estar dependente do raio de acção da agulha do vibrador, que muitas vezes tem de ser mudado de local;
- **Melhoria das condições de trabalho e do meio ambiente:** a eliminação da vibração no processo de colocação do betão, resulta numa diminuição do ruído associado, o qual é prejudicial tanto para a saúde dos trabalhadores como para o meio ambiente. A ausência de vibração permite a melhoria das condições de trabalho, bem como, cumprir os regulamentos relativos à poluição sonora;
- **Maior liberdade na concepção estrutural:** devido à sua capacidade auto-compactante, é possível a utilização de elementos estruturais como as mais diferentes formas, mesmo que complexas. Existe assim, uma maior flexibilidade ao nível da disposição, espaçamento e densidade de armaduras, o que permite uma maior liberdade em termos de projecto e arquitectura, com menores restrições práticas ao nível destas;
- **Maior durabilidade e melhor acabamento:** como é sabido no betão corrente, uma deficiente vibração causa a redução da sua durabilidade. Ora, o betão auto-compactável, como não necessita de vibração, origina estruturas mais homogéneas, o que proporciona um incremento da sua durabilidade. O acabamento superficial deste tipo de betão tem geralmente qualidade superior ao betão corrente.

Quanto aos inconvenientes do betão auto-compactável estes podem-se resumir aos seguintes aspectos:

- **Elevados custos:** ao contrário do betão corrente, o betão auto-compactável possui na sua composição uma elevada quantidade de finos, que por sua vez, é o componente mais dispendioso no custo total do betão. Contudo, apesar deste incremento no custo do betão, se pensarmos na relação custo/benefício, é possível reduzir os custos associados, devido à redução do tempo total de obra consequência de uma menor quantidade de trabalho. A maior durabilidade da estrutura também acarreta uma redução dos custos indirectos, visto não ser necessário trabalhos de reparação e reforço da estrutura;
- **Maior sensibilidade a variações dos constituintes:** o betão auto-compactável é bastante influenciado pela variabilidade dos seus materiais constituintes e como tem uma grande quantidade de ligante na sua constituição está mais susceptível à retracção e fluência;
- **Cofragens estanques:** como se trata de um betão mais fluido, é necessário ter cuidados especiais com as cofragens, quer ao nível da estanquidade, quer ao nível da sua solidez e limpeza.

2.4.3. Aplicações Práticas

Como já foi referido, o betão auto-compactável foi pela primeira vez empregue em obra no Japão, no início da década de 90, país pioneiro no desenvolvimento deste novo tipo de betão. No início da sua utilização, era sobretudo usado em situações onde a colocação do betão era de difícil execução devido a grande densidade de armaduras. Com a construção dos primeiros edifícios, pilares e vãos de pontes no Japão, tornou-se claro que o leque de aplicações do betão auto-compactável é bem mais vasto, o que fez aumentar gradualmente a sua utilização. Em seguida são descritas as principais aplicações práticas do betão auto-compactável:

- Fundações, pilares, lajes, vigas e peças delgadas;
- Peças com alta densidade de armadura;
- Tuneis (arcos de sustentação) e Pontes (maciços de ancoragens, pilares, vigas);
- Peças com dimensões reduzidas e estruturas pré-moldadas;
- Reabilitação e/ou reforço de estrutura.

3. MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

O terceiro capítulo da presente dissertação é responsável pela descrição e caracterização dos materiais utilizados, bem como os ensaios, equipamentos e procedimentos usados para elaborar e caracterizar as composições estudadas.

Os materiais utilizados foram seleccionados de acordo com a sua qualidade e conformidade no sentido de minimizar interferências que poderiam influenciar os resultados dos ensaios. Depois de seleccionados os materiais, procedeu-se ao estudo das composições a estudar, tendo como objectivo a obtenção de um betão com elevado teor de adições e com características auto-compactáveis.

A realização dos ensaios laboratoriais pretendeu caracterizar as diferentes composições a estudar, tanto no estado fresco, como no estado endurecido. No estado fresco, foi pretendido caracterizar a trabalhabilidade, nomeadamente a auto-compactabilidade das misturas. No que diz respeito ao estado endurecido, deu-se enfoque às características mecânicas e de durabilidade das diferentes composições.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, situado no Campus de Azurém, Guimarães.

3.1. Características dos Materiais Utilizados

3.1.1. Cimento

O cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico, finamente moído, que convenientemente amassado com água, forma uma pasta que devido a reacções de hidratação, faz presa, endurece e permanece mecanicamente resistente e estável, tanto ao ar como na água, em condições normais de aplicação (NP 2064, 1991).

Para a realização deste trabalho foi utilizado cimento Portland, cimento do tipo I e classe 42.5R (CEM I 42.5R), certificado de acordo com a norma NP EN 197-1 (2001) e gentilmente cedido pela empresa CIMPOR – Industria de Cimentos, SA. O cimento foi fornecido à Universidade do Minho numa só remessa, por forma a eliminar possíveis variações nas suas características, sendo armazenado no laboratório de forma conveniente.

Foi escolhido o cimento de Portland devido à necessidade de isolar e avaliar o efeito das adições, daí que a escolha recaiu sobre um cimento não composto. Nos Quadros seguintes, são apresentadas as suas principais características químicas, físicas e mecânicas do cimento Portland.

Quadro 7 - Composição química do cimento Portland (CIMPOR Betões, 2008)

Composição Química	Valor declarado (%)
SiO ₂	19,92
Al ₂ O ₃	4,36
Fe ₂ O ₃	3,51
CaO	62,92
MgO	1,83
SO ₃	2,86
Perda ao Fogo	3,12

Quadro 8 - Características físicas do cimento Portland (Ficha técnica)

Características físicas	Valor declarado
Início de presa	≥ 60 min
Expansibilidade	≤ 10 mm

Quadro 9 - Características mecânicas do cimento Portland (Ficha Técnica)

Características	Resistência à Compressão (Valores mínimos)	
	2 dias	28 dias
Mecânicas	20,0 MPa	42,5 MPa

3.1.2. Cinzas Volantes

Neste trabalho de investigação, as cinzas volantes foram utilizadas como adição pozolânica, e foram fornecidas pela empresa Endesa Generation S.A. de Compostilla, situada em Espanha, sendo classificadas de acordo com a norma NP EN 450-1 (2008). As cinzas volantes possuem uma perda ao fogo entre 2% e 7% em massa, pertencendo à classe B, sendo o objectivo deste requisito limitar a quantidade de carbono não queimado nas cinzas volantes, já o seu módulo de finura pertence à classe N, sendo o valor declarado de 15% e a percentagem de retidos inferior a 40% em massa no peneiro 0,045mm. Segundo a empresa fornecedora as cinzas volantes possuem massa volúmica declarada de 2420 kg/m³, e cuja composição química é descrita em seguida no Quadro 10

Quadro 10 - Composição química das cinzas volantes (CIMPOR Betões, 2008)

Composição Química	Valor declarado (%)
SiO ₂	48,61
Al ₂ O ₃	23,79
Fe ₂ O ₃	7,91
CaO	3,06
MgO	2,07
SO ₃	0,4
Na ₂ O	0,78
K ₂ O	3,78
Perda ao fogo	2,64

3.1.3. Metacaulino

O metacaulino utilizado para a realização deste trabalho de investigação, foi obtido a partir do caulino fornecido à Universidade do Minho pela empresa Mibal – Minas de Barqueiros, S.A.. Após a recepção do caulino, este foi enviado para uma empresa de produtos cerâmicos, onde passou por todo o processo de transformação necessário para a sua transformação em metacaulino. No Quadro 11 apresenta-se a composição química do metacaulino, obtida por espectroscopia de fluorescência por raio-x (FRX), realizada a partir de uma amostra do metacaulino utilizado.

Quadro 11 - Composição química do metacaulino (Anjos, 2012)

Composição química	Valores declarados (%)
SiO ₂	45,89
Al ₂ O ₃	40,03
Fe ₂ O ₃	7,26
K ₂ O	4,7
TiO ₂	1,49
CaO	0,41
Rb ₂ O	0,097
SrO	0,062
SO ₃	0,061

3.1.4. Cal Hidratada

No decorrer desta dissertação, a cal hidratada foi utilizada como uma adição no betão produzido e, quando usada esta foi acrescentada a massa do ligante previamente definida, perfazendo 5% da massa total do material cimentício.

Esta foi adquirida à empresa Calcidrata – Industrias de Cal, S.A., sendo posteriormente armazenada de forma conveniente no laboratório da universidade. As propriedades físicas e químicas da cal hidratada são apresentadas nos Quadro 12 e 13 respectivamente, de acordo com dados fornecidos pela empresa produtora.

Quadro 12 - Propriedades físicas da cal hidratada (Calcidrata, 2010)

Composição Física			
Parâmetro		Valores Típicos	
Granulometria		% de amostra retida	% de amostra passada acumulada
Malha do peneiro (mm)	0,6	≤ 0,1	≥ 99,9
	0,09	≤ 5,5	≥ 94,4
	Fundo	≥ 94,4	≥ 94,4

Quadro 13 - Composição química da cal hidratada (Calcidrata, 2010)

Composição Química	
Parâmetro	Valores Típicos
Humidade	≤ 0,5 %
Massa específica aparente	≤ 600 kg/m ³
Ca(OH) ₂	≥ 96 %
MgO	< 0,85 %
CaCO ₃	< 2,0 %
MnO ₂	< 0,05 %
SiO ₂	< 0,4 %
Al ₂ O ₃	< 0,5 %
Fe ₂ O ₃	< 0,08 %
As	< 5 mg/kg
Cd	< 2 mg/kg
Cr	< 20 mg/kg
Hg	< 0,3 mg/kg
Ni	< 5 mg/kg
Pb	< 1 mg/kg
Sb	< 0,2 mg/kg
Se	< 0,5 mg/kg

3.1.5. Agregados

Para a realização deste trabalho experimental, optou-se por utilizar uma brita e uma areia natural rolada. Escolheu-se uma areia rolada porque está demonstrado que, a utilização de areias britadas em detrimento das roladas pode contribuir para um pior desempenho dos betões produzidos, especialmente no que diz respeito à sua trabalhabilidade, o que normalmente obriga ao aumento da quantidade de água da amassadura (Azevedo, 2011).

A fracção grossa do agregado foi obtida numa pedreira localizada na freguesia de Gonça, concelho de Guimarães e explorada pela *Britaminho, Granitos e Britas do Minho, Lda.*. A escolha recaiu sobre esta pedreira devido à sua proximidade e, acima de tudo, devido ao facto de se tratar de uma empresa certificada, o que garante a qualidade dos seus agregados. Quanto à fracção fina do agregado, está foi adquirida à empresa *José de Oliveira Nogueira & Filhos SA*, situada na freguesia de Azurém, concelho de Guimarães.

Após a escolha dos agregados a utilizar, procedeu-se à determinação das suas granulometrias através do método de peneiração a seco, utilizando para tal o agitador de peneiros (Figura 8) disponível no laboratório.



Figura 8 - Série de peneiros e máquina de agitação para análise granulométrica

A análise granulométrica foi efectuada segundo a norma NP EN 933-1 (2000), com os peneiros especificados pela norma NP EN 933-2 (1999), sendo os resultados apresentados no Quadro 14 e assim como as respectivas curvas granulométricas na Figura 9.

Quadro 14 - Análise granulométrica dos agregados

Areia				Brita			
Massa seca total M_1 (kg)		1,001		Massa seca total M_1 (kg)		1,005	
Massa seca após lavagem M_2 (kg)		1,001		Massa seca após lavagem M_2 (kg)		1,005	
Massa seca dos finos removidos por lavagem M_2 (kg)		0,000		Massa seca dos finos removidos por lavagem M_2 (kg)		0,000	
Dimensões (mm)	Massa (kg)	% Retido	% Cumulativo passado	Dimensões (mm)	Massa (kg)	% Retido	% Cumulativo passado
63	0,000	0	100	63	0,0000	0	100
31,5	0,000	0	100	31,5	0,0000	0	100
16	0,000	0	100	16	0,0000	0	100
8	0,000	0	100	8	0,8740	87	13
4	0,0197	2	98	4	0,1219	12	1
2	0,1962	20	78	2	0,0004	0	1
1	0,2498	25	53	1	0,0000	0	1
0,5	0,2164	22	31	0,5	0,0000	0	1
0,25	0,1920	19	12	0,25	0,0000	0	1
0,125	0,0924	9	3	0,125	0,0000	0	1
0,063	0,0162	2	1	0,063	0,0000	0	1
P	0,0154	-	-	P	0,0054	-	-
% Finos	-	1,5	-	% Finos	-	0,5	-
Total	0,998	100	-	Total	1,002	100	-
$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} =$		0,3%	Ensaio válido (< 1%)	$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} =$		0,3%	Ensaio válido (< 1%)

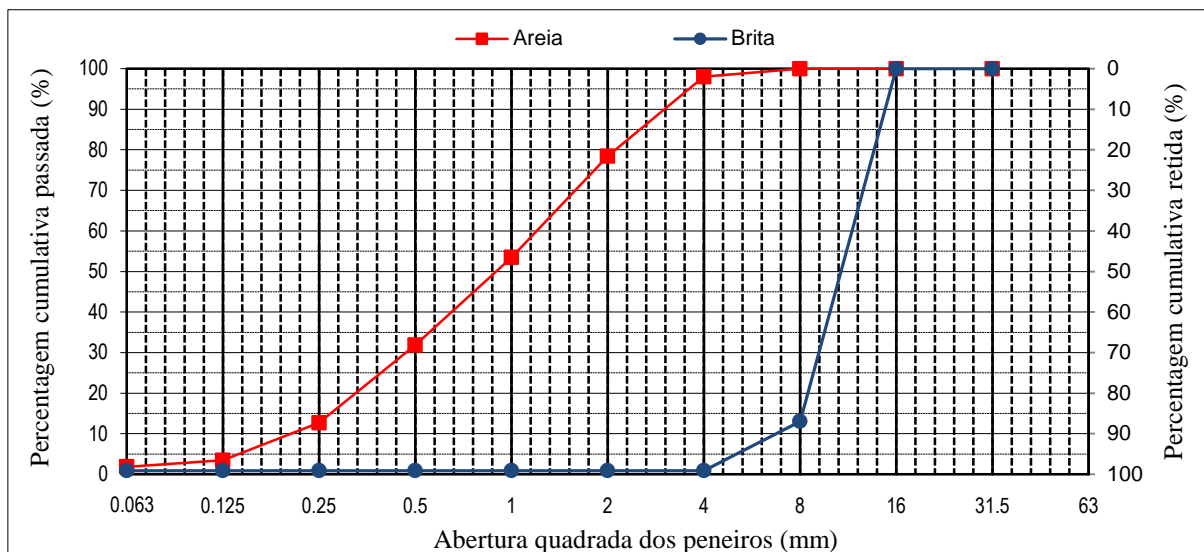


Figura 9 - Curva granulométrica dos agregados

A partir da análise da granulométrica dos agregados é possível obter as características geométricas dos mesmos como o módulo de finura, a dimensão máxima e o seu teor de finos, sendo os resultados obtidos apresentados no Quadro 14.

Quadro 15 - Características dos agregados

Agregado	Dimensão máxima (mm)	Módulo de finura	Teor de finos (NP EN 933-1)
Areia	4	4,02	≤ 4,99%
Brita	16	5,94	≤ 1,44%

3.1.6. Água

A água utilizada na realização de todas as amassaduras foi proveniente da rede pública de abastecimento de Guimarães. Não foi necessário proceder à sua análise, visto que segundo a norma NP EN 1008 (2005), basta que a água seja potável, para que seja considerada como apta para o fabrico de betões e argamassas.

3.1.7. Superplastificante

Os superplastificantes são adjuvantes para betão, substância utilizada em percentagens inferiores a 5% da massa do cimento, adicionadas durante a amassadura aos componentes da mistura, com o objectivo de modificar certas propriedades destes materiais quer no estado fresco, quer no estado endurecido. Um superplastificante é definido como uma substância capaz de promover uma alta redução da dosagem de água de uma determinada mistura, sem afectar a sua trabalhabilidade, para além de ser capaz de aumentar consideravelmente a trabalhabilidade, sem alteração da dosagem de água, sendo que, estes dois efeitos podem ser obtidos em simultâneo ou em separadamente.

Para a realização das diferentes amassaduras foi utilizado o superplastificante Glenium Sky 617, fabricado pela BASF. Segundo o fabricante, trata-se de um adjuvante superplastificante de nova geração, com base numa cadeia de éter policarboxílico modificado, indicado para a indústria do betão, com elevada manutenção da trabalhabilidade e durabilidade.

Segundo a ficha técnica disponibilizada pelo fabricante, a dosagem normalmente recomendada é aproximadamente de 1.3 kg por 100 kg de ligante. Contudo, são possíveis dosagens inferiores ou superiores (1 a 1.7 kg por 100 kg de ligante) às indicadas, mediante a realização de ensaios prévios, em função da relação água/ligante, do tipo de cimento (ligante), da granulometria utilizada, etc. Os resultados são maximizados quando o superplastificante é adicionado após todos os restantes componentes formarem uma mistura homogénea e após a adição de pelo menos 70% da água total da amassadura. No Quadro 16 são apresentadas características técnicas do Glenium Sky 617, fornecidas pelo fabricante, conformes segundo a norma NP EN 934-2 (2009):

Quadro 16 - Características técnicas do superplastificante (Ficha Técnica)

Função principal	Superplastificante / Forte redutor de água
Marcação CE	Segundo NP EN 934-2 como T11.1, T11.2
Aspecto	Líquido castanho
Densidade relativa (20 °C)	1,05 ± 0,02 g/cm ³
pH	7,3 ± 1.5
Teor em iões cloreto	< 0.1 %

3.2. Composições Estudadas

As propriedades fundamentais que são exigidas a um betão são a trabalhabilidade, no seu estado fresco, para além da resistência e durabilidade, no estado endurecido. Assim, o estudo da composição de um betão deve ser efectuado no pressuposto de que este, para cada situação particular, atinge a resistência, durabilidade e trabalhabilidade que lhe são exigidas.

O comportamento do betão depende muito do tipo e dosagem do ligante utilizado, da dosagem de água e dos adjuvantes. A dosagem de ligante tem grande influência na trabalhabilidade, embora também tenha uma influência importante na resistência e durabilidade do betão. As misturas pobres em ligante apresentam um aspecto áspero, pouco trabalhável e com tendência a segregar, tendo ainda um acabamento superficial difícil.

Para a realização da presente dissertação, a escolha do material ligante foi feita em função dos objectivos a que esta se propunha. Importa, então, salientar que as adições minerais têm uma influência importante no comportamento do betão e foram escolhidas de acordo com as vantagens que estas poderiam acrescentar ao betão em termos de resistência mecânica e durabilidade. Assim optou-se pelo uso de materiais com características pozolânicas, tais como, cinzas volantes, metacaulino e cal hidratada, materiais esses, capazes de proporcionar betões que cumpram os objectivos a que a dissertação se propõe.

Foram, então, definidas as composições a estudar, tendo como objectivo a produção de um betão com elevados teores de adição e com características auto-compactantes. Optou-se assim, pela realização de quatro composições com uma dosagem de ligante de 400 kg/m^3 (cimento mais adições), com diferentes teores de adições, bem como, uma composição de referência de 300 kg/m^3 utilizando exclusivamente cimento Portland como ligante. As composições estudadas foram efectuadas segundo, o traço 1:1,95:2,93:0,2 anteriormente usado por Camões (2006), para além de se ter optado por uma percentagem de argamassa de 61%, no sentido conferir às misturas características auto-compactáveis.

O volume de betão produzido para cada amassadura foi de $0,087 \text{ m}^3$, valor que está majorado em cerca de 15%, para compensar eventuais desperdícios de betão aquando da execução da amassadura. Estabeleceu-se que o teor de cimento Portland utilizado iria variar entre os 30 e 40% do material cimentício, sendo que as adições representariam cerca de 60 ou 70% do

mesmo. A cal hidratada, quando usada foi acrescentada a massa do ligante previamente definida, perfazendo 5% da massa total do material cimentício.

As composições estudadas e as respectivas dosagens utilizadas para um volume de betão de 1 m³, são apresentadas no Quadro 17, sendo o teor de ligante considerado como a soma do cimento e das adições minerais usadas.

Quadro 17 – Composições estudadas e respectivas dosagens

Composições	Quantidades								
	C (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	MTK (kg/m ³)	CH (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	A/L	SP (%)
CV50M20	120	200	80	-	1033,6	916,4	140	0,35	3,94
CV50M20CH5	120	200	80	20	1033,6	916,4	140	0,33	3,52
CV60CH5	160	240	-	20	1033,6	916,4	140	0,33	3,23
CV60	160	240	-	-	1033,6	916,4	140	0,35	3,1
REFERÊNCIA	300	-	-	-	1053	867	180	0,6	3,26

3.3. Ensaio Realizados

O programa de ensaios foi desenvolvido por forma a avaliar diversos parâmetros que estão intrinsecamente ligados ao objectivo deste estudo. Isto é, avaliar até que ponto a incorporação de elevados volumes de adições minerais consegue produzir um betão, capaz de manter ou mesmo melhorar o desempenho mecânico e sua durabilidade face ao betão convencional.

Com os ensaios realizados pretendeu-se caracterizar as várias composições estudadas, quer no seu estado fresco, avaliando a sua trabalhabilidade e capacidade auto-compactante, quer no estado endurecido, onde se pretendeu, sobretudo, avaliar a durabilidade dos betões produzidos, sem descurar o seu desempenho mecânico. Nos subcapítulos seguintes serão descritos os procedimentos de cada ensaio efectuado para a realização deste estudo.

3.3.1. Amassadura

As amassaduras têm por objectivo a produção de misturas homogéneas, sem a ocorrência de segregação, capazes de garantir um bom envolvimento dos agregados pela pasta ligante e originar um betão facilmente trabalhável.

Para garantir a homogeneidade das várias amassaduras, adoptou-se um único procedimento de mistura, baseado na norma NP EN 206-1 (2005) e nas prévias experiências laboratoriais. Todas as amassaduras foram realizadas na mesma misturadora (Figura 10), de pás rotativas e eixo vertical, cuja capacidade máxima é de 90 litros.



Figura 10 - Misturadora utilizada

O procedimento de mistura adoptado foi o seguinte:

1. Molhagem das paredes da misturadora.
2. Período de espera entre 5 a 10 minutos, de forma a escoar a água em excesso da misturadora.
3. Introdução dos agregados, primeiramente o agregado grosso e posteriormente o agregado fino.
4. Misturou-se mecanicamente os agregados durante aproximadamente 3 minutos
5. Em seguida, foram adicionados os materiais ligantes utilizados em cada amassadura.
6. Misturou-se mecanicamente a mistura durante aproximadamente 3 minutos.
7. Com a misturadora em funcionamento adicionou-se lentamente cerca de 80% da água de amassadura prevista durante aproximadamente 2 minutos, deixando-se misturar até perfazer 5 minutos.
8. Verificou-se homogeneidade da mistura e se necessário parou-se a misturadora e efectuou-se a raspagem das paredes da mesma, bem como se misturou manualmente.

9. Com a misturadora em funcionamento, introduziu-se lentamente a quantidade de superplastificante estabelecida juntamente com os 20% de água restantes e deixou-se misturar aproximadamente 5 minutos ou até se obter uma mistura homogénea.

Todas as misturas foram realizadas segundo o processo descrito, sendo o tempo total de amassadura aproximadamente 15 minutos para as várias composições.

3.3.2. Comportamento do Betão Fresco

Após a execução das várias amassaduras, foram imediatamente avaliadas as propriedades do betão produzido no seu estado fresco. Os requisitos exigidos a um betão auto-compactável no estado fresco, são explanados na norma NP EN 206-9 (2010), a qual estabelece regras adicionais para o betão auto-compactável, uma vez que a norma NP EN 206-1 (2005) apenas abrange betões correntes.

Assim, de modo a avaliar a trabalhabilidade das diferentes composições e as diferentes classes de consistência, procedeu-se à realização de uma serie de ensaios. Segundo a norma NP EN 206-9 (2010), de modo a proceder a uma correcta caracterização de um betão auto-compactável, no estado fresco, devem ser caracterizados quatro parâmetros chave de ensaio, tais como:

- **Fluidez e capacidade de preenchimento:** Foi avaliada pelo ensaio de espalhamento (Figura 11) de acordo com a norma NP EN 12350-8 (2010), também conhecido por Slump-flow test e, pretende verificar se o betão sob a acção do seu peso próprio é capaz de se espalhar até atingir determinada dimensão em determinado tempo. Este ensaio é utilizado para verificar a capacidade de preenchimento do betão auto-compactável e está directamente relacionado com a sua fluidez. O ensaio consiste em verter o betão fresco para o cone de Abrams apoiado sobre a base de 900x900 mm, posteriormente o cone é levantado lentamente, iniciando-se simultaneamente o cronómetro a quando do levantamento do cone, registando-se o tempo que o betão demorou a fluir até atingir o diâmetro de 500mm, sendo este tempo é denominado de tempo de fluxo, T_{500} . Cessado o espalhamento mede-se dois diâmetros perpendiculares e calcula-se a média final de espalhamento.

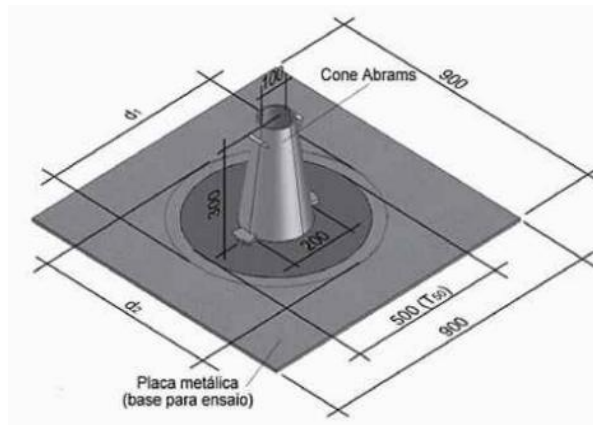


Figura 11 - Ensaio de espalhamento (Métodos de dosagem de concreto autoadensável, 2009)

- Viscosidade:** A viscosidade e a capacidade de enchimento do betão auto-compactável, no estado fresco, foram avaliadas pelo teste do Funil-V, de acordo com a norma NP EN 12350-9 (2010). Pretende simular a capacidade de passagem do betão através de um estreitamento da secção, apenas sob a acção do seu peso próprio, sendo também utilizado para verificar a presença de segregação quando o betão é impedido de escorrer pela saída do funil. O ensaio consiste em preencher o funil em forma de V (Figura 12) com betão fresco e posteriormente medir o tempo que este demora a fluir na sua totalidade pelo orifício inferior do funil, cujas dimensões mínimas da secção devem ser três vezes o tamanho máximo do agregado. A dimensão do orifício inferior deve variar entre 6,5 cm a 7,5 cm.

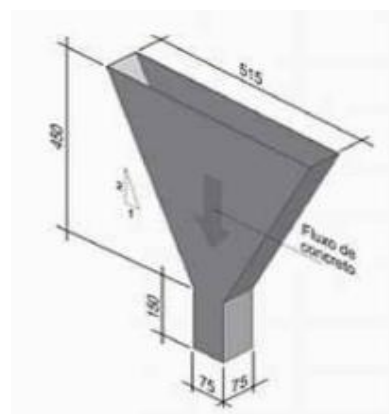


Figura 12 - Ensaio do funil-V (Métodos de dosagem de concreto autoadensável, 2009)

- Capacidade de passagem:** Foi avaliada pelo ensaio L-Box e pelo ensaio do Anel-J. O ensaio L-Box, foi realizado de acordo com a norma NP EN 12350-10 (2010) e tem por objectivo verificar a capacidade do betão fresco em fluir, sob a força do seu peso próprio, através de espaços confinadas, incluindo espaços entre armadura e outras

obstruções, sem que ocorram bloqueios ou segregação. Avalia-se assim a habilidade passante do betão auto-compactável por entre espaços pequenos e congestionados. O ensaio consiste na colocação de uma L-Box (Figura 13) em posição estável e horizontalmente nivelada. O trecho vertical da L-Box é preenchido com aproximadamente 12 litros de betão fresco, em seguida espera-se cerca de 60 segundos para ver se a amostra apresenta sinais de segregação.

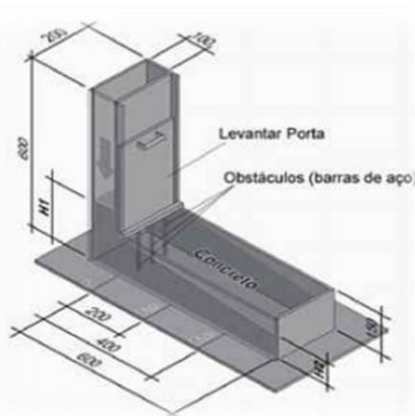


Figura 13 - Ensaio L-Box (Métodos de dosagem de concreto autoadensável, 2009)

Posteriormente levanta-se a porta deslizante e deixa-se o betão fluir até cessar o movimento registando-se o tempo decorrido. Quando o betão cessar o seu movimento, é medido a altura do betão no final do trecho horizontal (H_2) e a altura do betão remanescente no trecho vertical (H_1). A habilidade passante é calculada pelo quociente de H_2 por H_1 . No que diz respeito ao ensaio J-Ring (Figura 14) este foi realizado, de acordo com a norma NP EN 12350-11 (2010), no sentido de colmatar os resultados obtido pelo ensaio de espalhamento, pois este, não proporciona uma medida directa para avaliar a habilidade passante do betão autocompactável. O ensaio é baseado no tradicional ensaio de espalhamento, contudo para simular possíveis obstruções, é colocado um anel de 30 centímetros de diâmetro em volta do cone de Abrams, constituído por barras de aço com 10 cm de altura. Após o início do espalhamento é medido o tempo que decorreu até o betão cessar o movimento, bem como, a extensão de espalhamento e o abaixamento dentro e fora do anel.

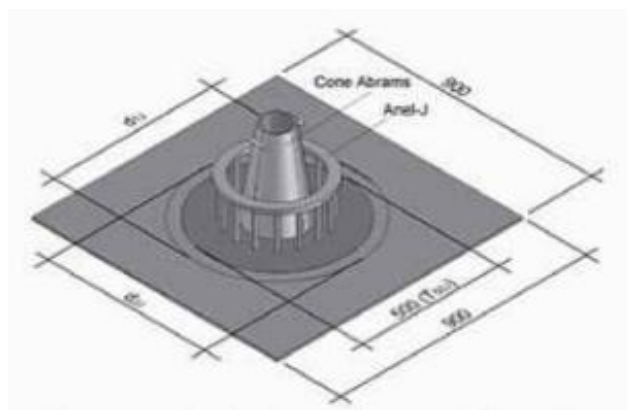


Figura 14 - Ensaio J-Ring (Métodos de dosagem de concreto autoadensável, 2009)

- **Segregação:** não foi efectuado nenhum ensaio para a avaliação deste parâmetro. Contudo todas as misturas aquando da realização dos ensaios descritos anteriormente apresentavam-se homogéneas, sem sinais de segregação.

3.3.3. Moldagem, Conservação, Tipo e Dimensões dos provetes

Após se verificar a conformidade das diferentes amassaduras realizadas, no seu estado fresco, procedeu-se ao preenchimento dos diversos moldes (Figura 15) e regularizou-se a superfície, deixando os provetes de ensaio nos moldes durante três dias à temperatura ambiente. Seguidamente, procedeu-se à desmoldagem dos provetes, curando-se os mesmos em água à temperatura de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ até às idades pretendidas (Figura 15). Estes processos foram realizados de acordo com as normas NP EN 12390-1 (2003) e NP EN 12390-2 (2003). Por cada amassadura, foram preenchidos 43 moldes cúbicos de 100 mm de aresta, 2 moldes cúbicos de 150 mm de aresta, bem como, 6 moldes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, 2 moldes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, para além de uma lajeta com dimensões de 600x150x700 mm.



Figura 15 - Moldes e cura dos diversos provetes

3.3.4. Avaliação do Comportamento Mecânico

O comportamento mecânico dos betões produzidos pode ser avaliado através de vários ensaios, das quais se podem destacar a resistência à compressão uniaxial, compressão diametral, flexão e corte (Camões, 2002). Neste trabalho prático, apenas foi avaliada a resistência à compressão uniaxial, de modo, a poder caracterizar a resistência a esforços de compressão.

3.3.4.1. Resistência à Compressão

Em geral, a característica mecânica mais importante num betão é a sua resistência à compressão uniaxial. Para a determinação da resistência à compressão os provetes foram ensaiados numa prensa hidráulica (Figura 16), conforme com a norma NP EN 12390-4 (2003). Foram submetidos a uma solicitação axial num ensaio de curta duração, ou seja, com uma elevada velocidade de carregamento, até à sua rotura.



Figura 16 – Prensa hidráulica

A forma dos provetes, a velocidade de carregamento e outros factores, como a idade do betão e as condições de cura têm uma grande influência na resistência medida. Os ensaios à compressão foram efectuados na prensa disponível no laboratório, em conformidade com a norma NP EN 12390-3 (2003), com uma velocidade de aplicação de carga de 7.0 kN/s, velocidade correspondente às dimensões dos provetes utilizados ($100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$).

Para todas as composições os provetes foram ensaiados aos 3, 7, 14, 21, 28, 90 dias de idade, sendo que, os resultados apresentados, resultam da média aritmética de ensaios em três provetes para cada uma das referidas idades, com a excepção dos 14 e 21 dias, onde só foram ensaiados dois provetes.

3.3.5. Avaliação da Durabilidade

A caracterização dos betões no estado endurecido não se deve cingir apenas à avaliação do seu comportamento mecânico, mas sim ser mais abrangente e incluir o seu desempenho face às principais formas de ataque que possam provocar a sua deterioração (Camões, 2002).

Procurou-se, assim, avaliar a durabilidade das diferentes composições produzidas, recorrendo à realização de seis ensaios distintos, correntemente utilizados para avaliar parâmetros de durabilidade dos betões: absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão (à pressão atmosférica), coeficiente de difusão dos cloretos, carbonatação e resistividade eléctrica.

3.3.5.1. Absorção de Água por Capilaridade

A absorção capilar reveste-se de particular importância na maioria das obras de betão na medida em que constitui um dos mecanismos preponderantes de entrada de água e agentes agressivos, nela dissolvidos, através do betão de recobrimento das armadura (Coutinho, 1998). Como tal, a absorção de água por capilaridade está directamente relacionada com a durabilidade das estruturas.

A absorção de água por capilaridade é definida como a diferença entre a massa do provete de betão endurecido que esteve com uma das faces em contacto com a água durante determinado período de tempo e a massa do provete seco, dividida pela área da superfície em contacto com a água (LNEC E393-1993).

Os ensaios foram realizados de acordo com os procedimentos descritos na especificação LNEC E 393 (1993), sendo que, foi decido alargar o tempo de medições para além das 3, 6, 24 e 72 hora, referidas no documento. Camões (2002) refere que as primeiras quatro horas são representativas da durabilidade das misturas uma vez que é nas idades jovens que se realiza o preenchimento dos poros de maior diâmetro, principais responsáveis pela penetração de fluidos líquidos e gasosos nos betões. Assim, e como a fase inicial é de grande importância, decidiu-se reforçar as medições neste período, foram então realizadas medições para 1,2,3,4,5,6, 24, 48 e 72 horas.

Aos 28 e 90 dias de idades, três provetes ($100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$) por cada composição estudada, foram retirados da câmara húmida e colocados na estufa ventilada a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ até obtenção de massa constante, de modo a eliminar qualquer humidade residual. Após a obtenção de massa constante, o ensaio foi realizado da seguinte forma:

1. Retirou-se os provetes da estufa e foram feitas medições da sua massa seca, M_0 ;
2. Colocou-se os provetes em tabuleiros (com suportes de borracha destinados a manter a face inferior do provete em contacto com a água) e procedeu-se ao enchimento deste com água até atingir a altura de $5 \pm 1 \text{ mm}$ acima da face inferior do provete (Figura 17).
3. Cobrindo em seguida os tabuleiros com a campânula, como uma pequena abertura. O nível da água foi mantido constante durante todo o ensaio;



Figura 17 - Ensaio de absorção por capilaridade

4. A quantificação da água absorvida foi feita através da pesagem dos provetes, realizada de acordo com o plano de pesagem pré-determinado, perfazendo 72 horas no total, e com início no primeiro contacto dos provetes com a água. Para efectuar as pesagens, retirar os provetes do tabuleiro e permitir que a água escorra do provete durante 60 ± 5 segundos numa superfície não absorvente. M_i , é a massa do provete para um determinado tempo, t_i ;
5. Após a realização de uma pesagem, voltou-se a colocar os provetes no tabuleiro até nova pesagem;
6. Repetiu-se os passos 3 e 4, até se cumprir todo o plano de pesagens.

Findado o ensaio é possível determinar, para cada tempo t_i , a absorção de água por capilaridade, calculada através da divisão do aumento de massa $M_i - M_0$ pela área da face inferior do provete que esteve em contacto com a água.

Os resultados da absorção capilar são expressos em kg/m^2 para cada tempo t_i e são calculados como foi dito pela seguinte expressão regulamentar:

$$A_C = \frac{M_i - M_0}{A} \quad (\text{eq.4})$$

Em que:

A_C : absorção de água por capilaridade, expressa em kg/m^2 ;

M_i : massa do provete no tempo t_i , expressa em quilogramas;

M_0 : massa do inicial do provete seco, expressa em quilogramas;

A : área da face inferior do provete em contacto com a água, expressa em m^2 .

Após determinada, para cada instante, a absorção capilar, a cinética de absorção capilar pode ser expressa graficamente como a variação da absorção capilar, A_c , ao longo da raiz quadrada do tempo, t_i .

3.3.5.2. Absorção de Água por Imersão

A absorção de água por imersão (à pressão atmosférica) é considerada a diferença entre a massa do provete de betão endurecido imerso em água e a massa do mesmo provete quando seco, expressa em termos do volume do provete (LNEC E394-1993).

Os ensaios para a determinação da absorção de água por imersão foram realizados de acordo com os procedimentos descritos na especificação LNEC E 394 (1993).

Aos 28 e 90 dias de idades, três provetes ($100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$) por cada composição estudada, foram retirados da câmara húmida e colocados na estufa ventilada a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ até obtenção de massa constante, de modo a eliminar qualquer humidade residual. Após a obtenção de massa constante, pesaram-se os provetes e realizou-se o ensaio da seguinte forma:

1. Introduziu-se os provetes num recipiente com água de consumo público, à temperatura de $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, até massa constante. Efectuou-se esta operação por etapas, de modo, a que os provetes fossem imersos sucessivamente em intervalos de 1 hora, a um terço da sua

altura, dois terços da sua altura e na totalidade da sua altura (Figura 18). O nível final da água não ultrapassou 20 mm da face superior do provete imerso;



Figura 18 - Ensaio de absorção de água por imersão

2. Pesaram-se os provetes até se alcançar massa constante. Considerou-se alcançada massa constante do provete saturado, quando a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas, intervaladas em pelo menos 24 horas, for inferior a 0,1% da média das duas leituras. Antes de cada pesagem secou-se a superfície dos provetes com um pano absorvente de modo a remover toda a água superficial;
3. Após alcançada a massa constante, pesou-se os provetes dentro de água, no sentido de obter a sua massa hidrostática, após saturação;
4. Seguidamente, retirou-se o provete de dentro de água e procedeu-se à sua secagem numa estufa ventilada a 105 °C, até se alcançar massa constante. Considerou-se alcançada massa constante do provete seco, m_3 , quando a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas, intervaladas em pelo menos 24 horas, for inferior a 0,1% da média das duas leituras.

Os resultados da absorção por imersão (à pressão atmosférica) são expressos, em percentagem e calculados pela seguinte expressão regulamentar:

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (\text{eq.5})$$

Em que:

m_1 : massa do provete saturado ao ar, expressa em quilogramas;

m_2 : massa hidrostática do provete saturado, expressa em quilogramas;

m_3 : massa do provete seco, expresso em quilogramas.

O valor da absorção por imersão foi obtido com a média aritmética dos três provetes utilizados e arredondados a uma casa decimal.

3.3.5.3. Difusão dos Cloretos

Camões (2002) refere que a difusão é um processo que consiste no transporte de matéria resultante do movimento aleatório das partículas. No caso dos betões, a difusão de gases, iões e vapores pode ocorrer devido à diferença de concentração do agente difusor existente entre o betão e o meio envolvente, na ausência de pressão hidráulica. O processo de difusão é induzido pela tendência verificada em equilibrar as diferenças de concentração existentes, resultando num fluxo de substância difusora de uma região de maior concentração para outra de menor concentração.

Associados ao mecanismo de difusão, um dos principais agentes de degradação do betão são os cloretos. O efeito da penetração deste agente no betão pode acarretar consequências extremamente graves na durabilidade das estruturas, associadas à ocorrência de corrosão das armaduras (Camões, 2002).

A resistência à difusão dos cloretos dos betões produzidos foi aferida pelo ensaio de migração em regime não estacionário, de acordo com os procedimentos descritos no documento normativo LNEC E-463 (2004).

O coeficiente de difusão pode ser calculado através da seguinte equação:

$$D = \frac{R \times T}{z \times F \times E} \times \frac{x_d - \alpha \times \sqrt{x_d}}{t} \quad (\text{eq.6})$$

sendo:

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad (\text{eq.7})$$

$$\alpha = 2 \times \sqrt{\frac{R \times T}{z \times F \times E} \times \text{erf}^{-1} \times \left(1 - \frac{2 \times c_d}{c_o}\right)} \quad (\text{eq.8})$$

em que:

D: coeficiente de difusão em regime não estacionário, em m^2/s ;

z: valor absoluto da valência do ião, para os cloretos, $z = 1$;

F: constante de Faraday, $F=9,648 \times 10^4 \text{ J}/(\text{V} \cdot \text{mol})$;

U: valor absoluto da voltagem aplicada, em Volts;

R: constante dos gases perfeitos, $R=8,314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$;

T: valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica, em graus Kelvin;

L: espessura do provete, em metros;

x_d : valor médio da profundidade de penetração, em metros;

t: duração do ensaio em segundos;

erf^{-1} : inverso da função erro;

c_d : concentração de cloretos para a qual ocorre a mudança de cor, $c_d \approx 0,07 \text{ N}$ para betão com cimento CEM I

c_o : concentração de cloretos na solução catódica, $c_o \approx 2 \text{ N}$

Visto que:

$$\text{erf}^{-1} \times \left(1 - \frac{2 \times 0,07}{2} \right) = 1,28 \quad (\text{eq.9})$$

Substituindo as constantes na fórmula geral do coeficiente de difusão, é possível obter a seguinte expressão simplificada:

$$D = \frac{0,0239 \times (273 + T) \times L}{(U - 2) \times t} \times \left(x_d - 0,0238 \times \sqrt{\frac{(273 + T) \times L \times x_d}{U - 2}} \right) \quad (\text{eq.10})$$

onde:

D: coeficiente de difusão em regime não estacionário, em $\times 10^{-12} \text{ m}^2/s$;

U: valor absoluto da voltagem aplicada, em Volts;

T: valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica, em graus Celsius;

L: espessura do provete, em milímetros;

x_d : valor médio da profundidade de penetração, em milímetros;

t: duração do ensaio, em horas;

Para a realização deste ensaio foram utilizados três provetes por cada composição, que foram ensaiados aos 90 dias de idade. Foram utilizados provetes cilíndricos com 100mm de diâmetro e 50mm de altura, proveniente do corte de provetes cilíndricos com 100mm de diâmetro e 200 mm de altura. Após o corte e lavagem dos provetes submeteram-se os provetes ao ensaio de difusão de cloretos por migração em regime não estacionário.

O ensaio para a determinação do coeficiente de difusão, foi realizado segundo o seguinte procedimento:

1. Após o corte e quando estes estavam secos superficialmente, colocaram-se os provetes num exsicador para se proceder ao tratamento por vácuo, durante cerca de três horas;
2. Seguidamente, suspendeu-se o vácuo por breves momentos e encheu-se o exsicador com uma solução saturada de Ca(OH)_2 (por dissolução de um excesso de hidróxido de cálcio em água) de modo a que todos os provetes ficassem imersos (Figura 19). Procedeu-se novamente ao tratamento por vácuo por mais uma hora, antes de se deixar ar entrar no exsicador;



Figura 19 - Exsicador com provetes imersos na solução de Ca(OH)_2

3. Mantiveram-se os provetes na solução durante 18 ± 2 horas;
4. Seguidamente, foram preparadas as soluções catódica e anódica. A solução catódica é uma solução a 10% em massa de NaCl em água da torneira, sendo que, a solução anódica é uma solução de NaOH 0,3M em água.
5. Encheu-se o reservatório catódico com cerca de 12 litros de solução com 10% de NaCl e colocaram-se os provetes dentro de mangas de borracha, sendo em seguida, colocados no reservatório sobre um suporte de plástico;
6. Encheu-se a manga sobre o provete com 300 ml da solução anódica;

7. Ligou-se o cátodo ao pólo negativo da fonte de alimentação e o ânodo ao pólo positivo;
8. Em seguida, registou-se a temperatura inicial e ligou-se a fonte de alimentação com uma voltagem pré-estabelecida de 30V, registando-se a intensidade de corrente inicial que passa em cada provete;
9. Conforme os valores obtidos, procedeu-se à correcção da corrente inicial, se necessário, registando-se em seguida o valor da nova corrente inicial, deixando o ensaio decorrer para o tempo correspondente à voltagem utilizada;
10. Após o tempo estabelecido, mediu-se a temperatura final, desligou-se a fonte de alimentação e retiraram-se os provetes das mangas, sendo lavados e partidos em seguida por compressão diametral;
11. Pulverizou-se sem demora as metades obtidas com uma solução de AgNO_3 0.1M, aguardando-se até ser visível o precipitado branco de cloreto de prata;
12. Finalmente, mediu-se a penetração dos cloretos com recurso a um paquímetro, segundo sete pontos centrais equidistantes.



Figura 20 - Ensaio de difusão dos cloretos por migração

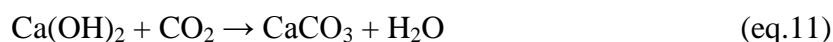
Foi utilizada a expressão simplificada para a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos, sendo os resultados arredondados às duas casas decimais. O valor da difusão dos cloretos, para cada composição, foi obtido pela média aritmética dos valores individuais.

3.3.5.4. Carbonatação

O carbono, juntamente com os iões de cloro, são os principais responsáveis pela despassivação das armaduras (Ferreira, 2000).

A carbonatação é causada pela entrada do dióxido de carbono (CO₂) presente na atmosfera através dos poros para o interior do betão que reage então como o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), produzindo carbonato de cálcio (CaCO₃) cujo pH é muito inferior ao necessário para manter a película passivante intacta. A importância da carbonatação, em relação à durabilidade do betão, reside no facto de reduzir o pH de cerca de 12,5 para valores inferiores a 9 que faz desaparecer a camada passivante e as armaduras ficam sujeitas às reacções com oxigénio e a água (Sousa, 2005).

A reacção ocorrida, pode traduzir-se, de forma simplificada, pela seguinte equação química:



A carbonatação depende, assim, da permeabilidade do betão, sendo que, no caso dos poros se encontrarem totalmente saturados, está não vai ocorrer, uma vez que o dióxido de carbono não consegue penetrar nos poros do betão.

A resistência à carbonatação dos betões produzidos foi avaliada através do método da carbonatação acelerada, os ensaios foram realizados de acordo com o descrito na especificação técnica FprCEN/TS 12390-12 (2010).

Assim, aos 28 dias de idade, seis provetes (100x100x100mm³) por cada composição estudada, foram retirados da câmara húmida, acondicionados num tabuleiro e deixou-se secar à temperatura ambiente no interior do laboratório, durante 14 dias. Após o período de acondicionamento, os provetes cúbicos foram selados com parafina deixando duas faces opostas livres, que permitem que a carbonatação apenas ocorra nesse sentido.

Depois de selados os provetes cúbicos, estes foram colocados no interior da câmara de carbonatação (Figura 21) com uma concentração de CO₂ de 4±0,5% do volume, temperatura

de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $55\pm 5\%$, durante determinado período de tempo e posicionados de modo a permitir que o ar circule livremente em volta das duas faces livres para serem carbonatadas. Assim, a profundidade de carbonatação foi medida após os seguintes períodos de exposição: 28, 56, 63, 70 e 90 dias.



Figura 21 - Câmara de carbonatação

Após os respectivos tempos de exposição, cortaram-se fatias dos cubos com aproximadamente 50mm, sendo em seguida, tratadas com fenolftaleína e medidas as respectivas profundidades de carbonatação. Foram utilizados dois provetes para cada tempo de exposição, sendo as faces cortadas do restante cubo seladas novamente com parafina e colocadas na câmara de carbonatação.

Para a medição da profundidade de carbonatação, dividiu-se a superfície expostas em seis distâncias iguais, sendo os cinco pontos centrais, usados para fazer a medição da profundidade de carbonatação. A medição foi feita com recurso a um paquímetro, sendo a profundidade de carbonatação medida perpendicularmente às duas superfícies expostas.

O valor da profundidade de carbonatação, para cada composição, foi obtido pela média aritmética dos valores individuais obtidos nos dois provetes utilizados por cada tempo de exposição, e arredondados às duas casas decimais.

3.3.5.5. Resistividade Eléctrica

A resistividade eléctrica de um betão caracteriza-se pela capacidade que este tem em se opor ao fluxo da corrente eléctrica. A partir da relação entre a intensidade de corrente aplicada e a diferença de potencial medida obtém-se a resistência eléctrica do material. Quanto menor for o valor da resistividade de um betão mais fácil é a passagem de corrente eléctrica sobre ele.

A resistividade eléctrica do betão pode ser avaliada segundo dois métodos, o método dos dois eléctrodos, por aplicação de duas chapas de inox em faces opostas, ou pelo método dos quatro eléctrodos, também conhecida por sonda de Wenner.

Neste trabalho para a avaliação da resistividade, foi utilizado o princípio da sonda de Wenner (Figura 22) que consiste em aplicar entre os dois eléctrodos exteriores uma baixa frequência em corrente alternada, enquanto a diferença de potencial é medida entre os dois eléctrodos interiores.

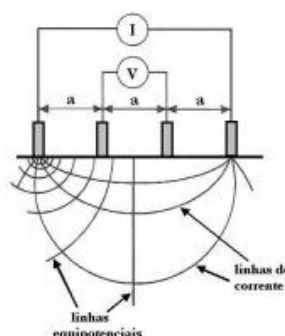


Figura 22 - Esquema de funcionamento da sonda de Wenner (Reis, 2009)

A partir da relação entre a intensidade de corrente aplicada e a diferença de potencial medida, obtém-se a resistência eléctrica do material. A resistividade eléctrica é, então, obtida multiplicando a resistência eléctrica do material por uma constante geométrica que depende das dimensões do provete e dos eléctrodos utilizados (Silva, 2011)

Para estudar a resistividade eléctrica dos betões produzidos, foram utilizados provetes cúbicos ($150 \times 150 \times 150 \text{mm}^3$), um por cada composição estudada, e a resistividade foi medida às idades de 3, 7, 14, 21, 28 e 90 dias, através de um ensaio não destrutivo, com um equipamento

denominado de RESIPOD (Figura 23) operado pela sonda de Wenner com quatro eléctrodos equidistantes, afastados 50mm entre si.



Figura 23 - Medição da resistividade com o RESIPOD

As leituras foram efectuadas na superfície dos provetes, após serem retirados da camara húmida onde permaneciam, sendo realizadas duas leituras na diagonal do cubo e perpendiculares entre si. Estas leituras foram efectuadas numa das faces laterais e na face oposta ao sentido da betonagem. O resultado obtido para a resistividade eléctrica resulta da média aritmética dos valores individuais para cada composição, sendo arredondados a uma casa decimal.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos durante a campanha experimental. Procurou-se avaliar e classificar convenientemente os betões produzidos face à sua resistência e durabilidade, bem como, discutir alguns destes resultados de forma a tentar despistar os efeitos das várias composições em estudo e criticar os valores obtidos.

4.1. Avaliação do Comportamento do Betão no Estado Fresco

Procurou-se avaliar as propriedades básicas dos betões auto-compactáveis no estado fresco (fluidez, viscosidade, habilidade passante e resistência à segregação), sendo estas, determinadas por intermédio de ensaios representativos, conforme o descrito na norma NP EN 206-9 (2010). Da análise dos resultados obtidos é possível avaliar e classificar convenientemente os betões produzidos, face às respectivas classes de consistência, contribuindo assim para uma correcta especificação do betão auto-compactável.

Para uma melhor apresentação dos resultados, optou-se pela apresentação conjunta dos resultados obtidos para as várias composições estudadas.

4.1.1. Fluidiez e capacidade de preenchimento

O valor do espalhamento está relacionado com a fluidez e a capacidade de preenchimento em condições não confinadas (NP EN 206-9). O espalhamento foi determinado através do ensaio de espalhamento com o cone de Abrams, realizado em conformidade com a NP EN 12350-8 (2010), complementado com novo ensaio de espalhamento no interior do Anel-J, de acordo com a norma NP EN 12350-12 (2010), sendo os resultados obtidos apresentados em seguida no Quadro 18.

Quadro 18 – Indicadores para avaliação da fluidez e capacidade de preenchimento

Composições	Espalhamento (mm)	Classe de Espalhamento	Espalhamento Anel-J (mm)	Classe de Espalhamento Anel-J
CV50M20	740	SF2	720	SF _J 2
CV50M20CH5	665	SF2	625	SF _J 2
CV60CH5	745	SF2	690	SF _J 2
CV60	755	SF2	705	SF _J 2
REFERÊNCIA	500	SF1	Obstruiu	-

A partir da análise dos resultados é possível verificar, que todos os betões produzidos, à excepção do betão de referência, possuem uma fluidez adequada, mesmo para baixas razões água/ligante, fruto do uso de grandes percentagens de adições minerais na sua composição e a utilização de superplastificante, o que provoca um aumento da sua trabalhabilidade.

Para classificar os betões produzidos quanto à sua classe de espalhamento, foram utilizadas as classificações previstas pela norma NP EN 206-9 (2010). Assim, verifica-se que à excepção da composição de referência, todas as outras composições apresentam valores de espalhamento dentro das classes previstas no documento referido, conferindo assim características auto-compactáveis aos betões produzidos.

As composições CV50M20, CV50M20CH5 e CV60CH5, cujos diâmetros de espalhamento se situam entre 660 e 750mm pertencem à classe SF2. A partir da análise qualitativa desta classe, é possível afirmar que os betões produzidos são aceitáveis para muitas das aplicações correntes, como por exemplo paredes e pilares. A composição CV60 com 755mm embora ultrapasse o limite da classe SF2 em 5mm foi classificada como pertencente à classe SF2, visto não atingir o limite mínimo da classe SF3 (760-850mm).

Domone (2006), após a consulta de diversos trabalhos de investigação, observou que cerca de 50% dos resultados obtidos nos ensaios de espalhamento, apresentam um diâmetro entre 650 e 700mm, e 90% dos resultados situam-se no intervalo entre 600 e 750mm (Figura 24). Os resultados obtidos neste trabalho de investigação vão de encontro aos resultados verificados por Domone, com a excepção da composição de referência, o que indicia que os betões produzidos possuem fluidez adequada.

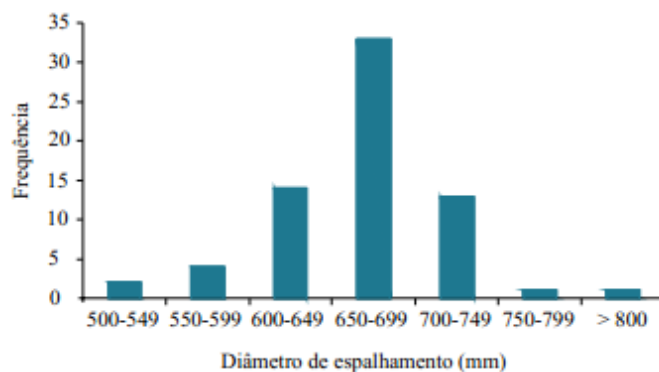


Figura 24 - Valores do diâmetro de espalhamento (adaptado de Danone, 2006)

A composição de referência, por sua vez, possui um diâmetro de espalhamento de 500mm e tal diâmetro não consta dentro dos limites estabelecidos para as classes de espalhamento, definidas no documento normativo acima referido. Contudo, a norma NP EN 206-9 (2010), refere uma tolerância de ± 50 mm para o ensaio de espalhamento, assim a composição de referência foi classificada como pertencente à classe SF1. Qualitativamente, esta classe de espalhamento é apropriada para estruturas não armadas ou com pouca armadura, como por exemplo lajes ou pavimentos. O decréscimo na classe de espalhamento pode dever-se ao elevado valor da razão água/ligante e ao facto de a composição de referência não possuir qualquer adição mineral, o que diminui o teor de finos na mistura e conseqüente diminuição da trabalhabilidade.

Para ter em conta a influência da armadura na fluidez do betão auto-compactável, o ensaio de espalhamento foi complementado, pela realização de um novo ensaio de espalhamento no interior do anel J (Figura 25), em conformidade com a EN 12350-12 (2010). A partir da análise do diâmetro de espalhamento do ensaio com o anel-J, é possível classificar o betão produzido face à sua classe de espalhamento no anel J.



Figura 25 - Ensaio de espalhamento no interior do anel J

Assim, estes pertencem à classe de espalhamento SF_J2, com a excepção do betão de referência, o qual obstruiu o anel J, sendo considerado que o traço não possuía habilidade passante. As restantes composições como foi dito pertencem à classe de espalhamento SF_J2, pelo que cumprem os requisitos de fluidez e capacidade de preenchimento, especificados na norma NP EN 206-9 (2010).

Pode-se verificar que as classes de espalhamento dos dois ensaios realizados complementam-se, confirmando assim a uniformidade do betão auto-compactável produzido, sendo esta classe como foi dito anteriormente, aceitável para muitas das aplicações correntes, como por exemplo paredes e pilares.

4.1.2. Viscosidade

A viscosidade de uma mistura caracteriza-se pela resistência do betão auto-compactável fresco ao escoamento, logo que este se inicia (NP EN 206-9).

A viscosidade pode ser avaliada por intermédio do ensaio do funil-V e respectivo tempo de escoamento, t_v , ou através do tempo de espalhamento, t_{500} , medido aquando da execução do ensaio de espalhamento. Para além destes dois critérios, para se ter em conta a influência das armaduras na capacidade de escoamento do betão auto-compactável, esta pode, complementarmente ser medida pelo tempo, t_{500J} , do ensaio de espalhamento no anel J.

Estes ensaios permitem classificar devidamente o betão produzido no que diz à sua viscosidade e capacidade de escoamento, propriedades fundamentais do betão auto-compactável no estado fresco. No Quadro 19, são apresentados os resultados obtidos nos vários ensaios efectuados para classificar a viscosidade das misturas produzidas, bem como, a classe de viscosidade, na qual se inserem.

Da análise dos resultados obtidos é possível verificar que existe complementaridade entre os tempos de escoamento dos diferentes ensaios efectuados, o que permite uma correcta classificação da sua classe de consistência.

Quadro 19 - Indicadores para avaliação da viscosidade

Composições	Espalhamento		Funil - V		Espalhamento Anel J	
	t ₅₀₀ (s)	Classe de Viscosidade	t _v (s)	Classe de Viscosidade	t _{500J} (s)	Classe de Viscosidade
CV50M20	3,3	VS2	10,4	VF2	5,72	VJ2
CV50M20CH5	3,61	VS2	9,09	VF2	7,65	VJ2
CV60CH5	3,81	VS2	6,14	VF1	6,23	VJ2
CV60	1,83	VS1	5,85	VF1	1,88	VJ1
REFERÊNCIA	4,2	VS2	N.R.	-	Obstruiu	-

Verifica-se que todas as composições com a exceção da composição de referência, estão dentro dos parâmetros mencionados na norma NP EN 206-9 (2010), e são passíveis de classificação de acordo com a sua classe de viscosidade, conferindo-lhes assim características auto-compactáveis.

As composições CV50M20 e CV50M20CH5, possuem tempos de escoamento, que se enquadram na classe de viscosidade VS2/VF2, descritas no documento normativo acima referido. Estas duas classes são similares e podem ser correlacionadas, sendo que quanto maior o tempo de espalhamento, maior a probabilidade de existirem efeitos tixotrópicos que podem ajudar a limitar a pressão na cofragem ou aumentar a resistência à segregação.

Por sua vez, as composições sem metacaulino, possuem tempos de escoamento que se inserem em duas classes diferentes. Na composição CVCH5, os resultados obtidos não são complementares, visto o tempo de espalhamento remeter a composição para a classe VS2 e o tempo de escoamento no funil V para a classe VF1. Já na composição CV60, existe complementaridade entre os diversos ensaios, retendo a composição para a classe VS1/VF1, caracterizada pela sua boa capacidade de preenchimento, mesmo na presença de grande densidade de armadura, apresentando capacidade de auto-nivelamento e melhor grau de acabamento, contudo o risco de exsudação ou segregação é maior.

No que diz respeito à composição de referência, apesar de possuir um tempo de espalhamento dentro dos parâmetros mencionados na norma NP EN 206-9 (2010), esta obstruiu o anel J, aquando do espalhamento dentro do mesmo. Assim, não foi realizado o ensaio do funil V, uma vez que se considerou que esta composição não possuía habilidade passante.

Tal como no subcapítulo 4.1.1, para ter em conta a influência da armadura na viscosidade da mistura, esta foi simulada pela utilização do anel J, aquando da realização do ensaio de espalhamento, sendo o tempo de escoamento, t_{500J} , o parâmetro utilizado para a sua classificação. Assim, para todas as misturas existe complementaridade entre os resultados obtidos, com e sem a utilização do anel J, excepto na composição CV60CH5, o que demonstra a uniformidade dos betões produzidos face aos ensaios realizados.

4.1.3. Capacidade de passagem

A capacidade de passagem relaciona-se com a capacidade do betão fresco escoar, sem perda de uniformidade ou sem provocar bloqueios, através de espaços confinados e aberturas estreitas, tais como zonas de grande densidade de armaduras (NP EN 206-9, 2010).

Para avaliar tal capacidade, foi efectuado o ensaio da caixa L, de acordo com a norma NP EN 12350-10 (2010), sendo os resultados obtidos apresentados no Quadro 20. De referir que a caixa L utilizada, possuía três varões espaçados entre eles 41 ± 1 mm, para simular a presença de armadura.

Quadro 20 – Indicadores para avaliação da capacidade de passagem

Composições	L-Box				Classe de Capacidade de Passagem
	t (s)	H2 (mm)	H1 (mm)	H2/H1	
CV50M20	10,49	900	950	0,95	PL2
CV50M20CH5	11,43	750	850	0,88	PL2
CV60CH5	9,15	850	880	0,97	PL2
CV60	6,34	850	900	0,94	PL2
REFERÊNCIA	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	-

Verifica-se que todas as composições estão dentro dos parâmetros mencionados na norma NP EN 206-9, e são passíveis de classificação de acordo com a sua classe de capacidade de passagem, conferindo assim características auto-compactáveis aos betões produzidos.

De referir que não foi efectuado o ensaio da caixa L para o betão de referencia, uma vez que este obstruiu o anel J aquando do ensaio de espalhamento, considerando-se que esta composição não possui capacidade de passagem.

Da análise de Quadro 20, é possível verificar que todas as composições apresentam uma razão entre a profundidade média do betão na secção horizontal da caixa (H2) e a profundidade média do betão na secção vertical (H1), superior a 0,8, pertencendo assim à classe PL2.

Qualitativamente, é possível afirmar que os betões pertencentes a esta classe são passíveis de serem usados em estruturas correntes, com espaçamento de armaduras entre 60 e 80mm, sem que haja o risco de bloqueio dos agregados na passagem do betão através das armaduras.

4.2. Avaliação do Comportamento Mecânico

Para a caracterização da resistência mecânica dos betões produzidos recorreu-se ao ensaio de compressão uniaxial. Foi pretendido avaliar o comportamento do betão endurecido em compressão uniaxial, procurando assim determinar o comportamento das diferentes misturas produzidas quando sujeitas a uma das principais acções mecânicas presentes na generalidade dos elementos estruturais.

4.2.1. Resistência à Compressão

A resistência à compressão das composições fabricadas foi avaliada em provetes cúbicos de 100mm de aresta. Foram moldados, por cada amassadura, provetes em número suficiente para estudar o seu comportamento, em seis idades distintas. Optou-se por avaliar a resistência mecânica dos provetes aos 3, 7, 14, 21, 28 e 90 dias de idades, tendo sido ensaiados três provetes por cada idade, com a excepção dos 14 e 21 dias de idade, onde apenas foram ensaiados dois provetes.

Com este procedimento, procurou-se caracterizar o desenvolvimento da resistência à compressão dos betões ao longo do tempo, respeitando-se as datas de ensaio estipuladas. Para a determinação da resistência à compressão, apenas foram considerados os valores que apresentaram um desvio relativamente ao valor médio inferior a 10%, calculando-se a média da tensão individual de cada provete e respectivo coeficiente de variação.

No Quadro 21, apresentam-se os resultados obtidos e respectivos coeficientes de variação, para as diferentes composições estudadas.

Quadro 21 – Resistência à compressão dos provetes ensaiados

Composição	Idade (dias)	Resistência à Compressão		
		Tensão Média (Mpa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
CV50M20	3	6,77	0,47	6,94 %
	7	9,53	0,68	7,14 %
	14	18,65	0,45	2,41 %
	21	22,05	0,57	2,59 %
	28	22,97	0,75	3,27 %
	90	28,00	0,85	3,04 %
CV50M20CH5	3	7,45	0,15	2,01 %
	7	14,10	1,39	9,86 %
	14	22,41	0,75	3,35 %
	21	23,86	1,94	8,13 %
	28	27,46	0,61	2,22 %
	90	33,51	2,86	8,53 %
CV60CH5	3	12,01	0,35	2,91 %
	7	14,76	0,27	1,83 %
	14	19,82	0,11	0,55 %
	21	23,35	0,31	1,33 %
	28	28,40	0,86	3,03 %
	90	40,65	1,83	4,50 %
CV60	3	8,09	0,74	9,15 %
	7	10,22	0,48	4,70 %
	14	15,78	0,14	0,89 %
	21	17,60	0,81	4,60 %
	28	20,02	0,30	1,50 %
	90	32,05	1,00	3,12 %
REFERÊNCIA	3	17,27	0,40	2,32 %
	7	24,29	0,30	1,24 %
	14	28,02	1,46	5,21 %
	21	30,25	0,62	2,05 %
	28	32,14	0,31	0,96 %
	90	34,89	1,26	3,61 %

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial foram elaborados diagramas (Figura 26) que relacionam a resistência à compressão dos provetes ensaiados com as diferentes idades estudadas.

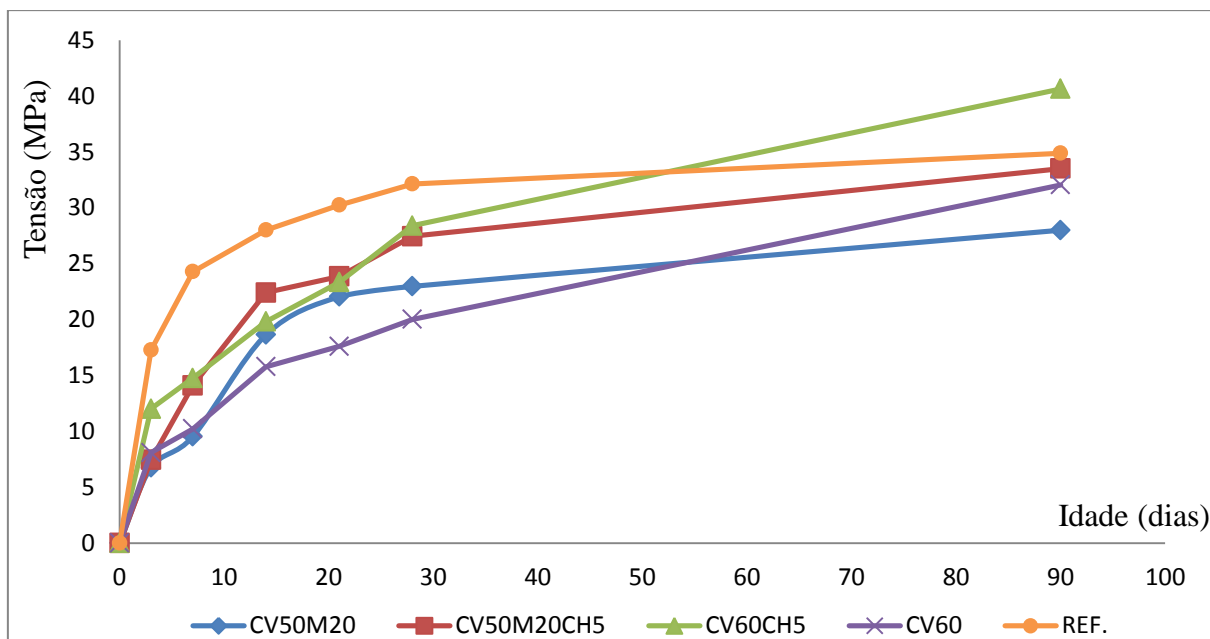


Figura 26 - Resistência à compressão até aos 90 dias de idade

Analisando o diagrama anterior, é possível constatar que as composições com a menor razão água/ligante (CV50M20CH5 e CV60CH5) são as que apresentam as resistências à compressão mais elevadas para todas as idades, quando comparadas com as restantes composições (CV50M20 e CV60). As resistências obtidas para as diferentes composições, parecem evidenciar que os betões produzidos possuem resistências à compressão adequadas para a sua utilização em estruturas correntes.

É interessante verificar que a cal hidratada parece potenciar a resistência à compressão das composições nas quais é usada. Comparando a composição CV50M20CH5 e CV60CH5, com as composições CV50M20 e CV60 respectivamente, parece haver uma tendência para a cal hidratada potenciar a resistência das misturas, de forma mais evidente na composição CV60CH5. A cal hidratada tem por finalidade aumentar a reserva de hidróxido de cálcio para as reacções pozolânicas, sendo que, o refinamento do tamanho dos grãos dar-se-á nas partículas de hidróxido de cálcio, oriundos da hidratação do cimento e da cal hidratada, reforçando a estrutura cristalina do CSH, mantendo a reserva alcalina, actuando no preenchimento dos poros, através do efeito filler (Filho, 2002). Isto atribui vantagens ao betão, traduzindo-se numa microestrutura mais compacta e num conseqüente incremento na resistência à compressão.

A substituição de grandes quantidades de cimento, por grandes volumes de adições minerais acarreta perdas de resistência até 60%, sobretudo nas idades iniciais, sendo que o desenvolvimento de resistências da composição de referência parece ter tendência para estagnar ao longo do tempo, ou seja, as composições com grandes percentagens de cinzas parecem recuperar ao longo do tempo.

Como é possível constatar na Figura 26, as composições CV60CH5 e CV60, aumentam consideravelmente a sua resistência ao longo do tempo, ou seja, é possível que composições como a CV60 com perdas de resistência aos 28 dias de 38% possam eventualmente superar a resistência do betão de referência com o decorrer do tempo. Tal facto, pode ficar a dever-se ao facto das cinzas volantes serem consideradas pozolanas pouco reactivas, o que se traduz num desenvolvimento lento da resistência inicial, actuando sobretudo nas resistências a longo prazo. Verifica-se, também que, efectivamente, a cal hidratada parece ter um efeito potenciador da resistência nas composições onde é usada e em todas as idades, visto a composição CV60CH5, superar efectivamente a resistência da composição de referência, ao contrário do que acontece na composição CV60.

Apesar do metacaulino ser considerado uma pozolana muito reactiva, seria de esperar, sobretudo nas idades iniciais, que o metacaulino pudesse mitigar o fraco desenvolvimento de resistências associado as cinzas volantes durante este período. Contudo, tal facto não foi totalmente claro, uma vez que as composições CV50M20 e CV50M20CH5 contendo 20% de metacaulino, apenas evidenciaram um ganho de resistência depois dos 7 dias de idade, quando comparados com as composições CV60CH5 e CV60, as quais não possuem metacaulino.

Tal facto parece indicar que o metacaulino utilizado não possuía grande reactividade, possivelmente por a sua granulometria não ser a mais adequada, uma vez que a eficácia pozolânica do metacaulino, é tanto maior quanto maior for a sua finura.

4.3. Avaliação da Durabilidade do Betão

Para que as estruturas produzidas tenham um adequado período de vida útil é necessário que o betão, para além de um bom comportamento mecânico, possua, também, um bom comportamento face a outras acções distintas das solicitações mecânicas. Assim, é imperioso avaliar o seu desempenho no que respeita à sua durabilidade, face às principais formas de ataque a que as estruturas estão sujeitas, procurando assim estudar a melhor forma de mitigar os efeitos negativos passíveis de causar deterioração nas estruturas e garantir a sua durabilidade.

Neste contexto, pretendeu-se avaliar o comportamento das diferentes composições estudadas, por intermédio de cinco ensaios laboratoriais correntemente utilizados, procurando estudar os principais factores de deterioração do betão, através dos seguintes ensaios: absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão (à pressão atmosférica), carbonatação, coeficiente de difusão de cloretos e resistividade eléctrica.

4.3.1. Absorção de Água por Capilaridade

A realização deste ensaio permite avaliar de forma eficaz a durabilidade de uma determinada composição, isto porque, quanto mais baixo forem os valores de absorção, maior será a dificuldade de penetração de agentes agressivos. Segundo Coutinho (2006), a absorção por capilaridade depende dos seguintes factores:

- Relação água/ligante: aumenta a absorção quando a relação água/ligante aumenta;
- Finura do ligante: diminui a absorção quando a finura do ligante aumenta;
- Idade: a absorção diminui à medida que a idade aumenta;
- Tempo de cura: a absorção diminui com o aumento do tempo de cura;
- Grau de consolidação: elevadas percentagens de finos, inertes, sem reactividade pozolânica, aumenta a absorção capilar.

A cinética da absorção capilar pode ser representada através de curvas que traduzam a variação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície do betão em contacto com a água, em função da raiz quadrada do tempo (Camões, 2002).

Camões (2002) refere que será de esperar que os diagramas representativos da absorção capilar, apresentem curvas com inclinação decrescente ao longo do tempo e com três partes distintas: uma primeira parte, com maior inclinação, representa o preenchimento dos capilares de maior diâmetro, ao longo de 1 ou 2 horas; na segunda parte, a curva possui uma inclinação menos acentuada, fruto do preenchimento dos capilares mais finos; a terceira e última parte da curva, representa a estabilização da água absorvida devido ao preenchimento da rede capilar.

Como foi referido em 3.3.5.1, para o ensaio de absorção capilar, as medições foram efectuadas aos 28 e 90 dias de idade, após obtenção de massa constante de modo a eliminar qualquer humidade residual, nos seguintes intervalos de tempo: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48 e 72 horas, fornecendo o acréscimo de massa ao longo destes períodos.

Um dos parâmetros correntemente utilizados para caracterizar absorção capilar dos betões, é o respectivo coeficiente de absorção capilar, o qual corresponde ao declive inicial da curva de absorção capilar, calculado em geral para as primeiras quatro horas de ensaio, sendo que neste caso foi calculado para as primeiras seis. Estes coeficientes foram determinados recorrendo ao método dos mínimos quadrados, não se obrigando a que a recta passasse pela origem e do qual também foi possível extrair o coeficiente de correlação R^2 , da regressão da recta que fornece o coeficiente de capilaridade.

Nas Figuras 27 e 28 são apresentadas as curvas de absorção capilar para os 28 e 90 dias de idade respectivamente, as quais correspondem aos valores médios, A_{cm} , para as diferentes composições, obtidos através do ensaio de três provetes por cada composição.

Já os coeficientes de absorção capilar das composições estudadas para as idades de 28 e 90 dias, são apresentados na Figura 29. As características das equações utilizadas para a obtenção do coeficiente de absorção capilar e respectivo coeficiente de correlação são expostas no Quadro 22.

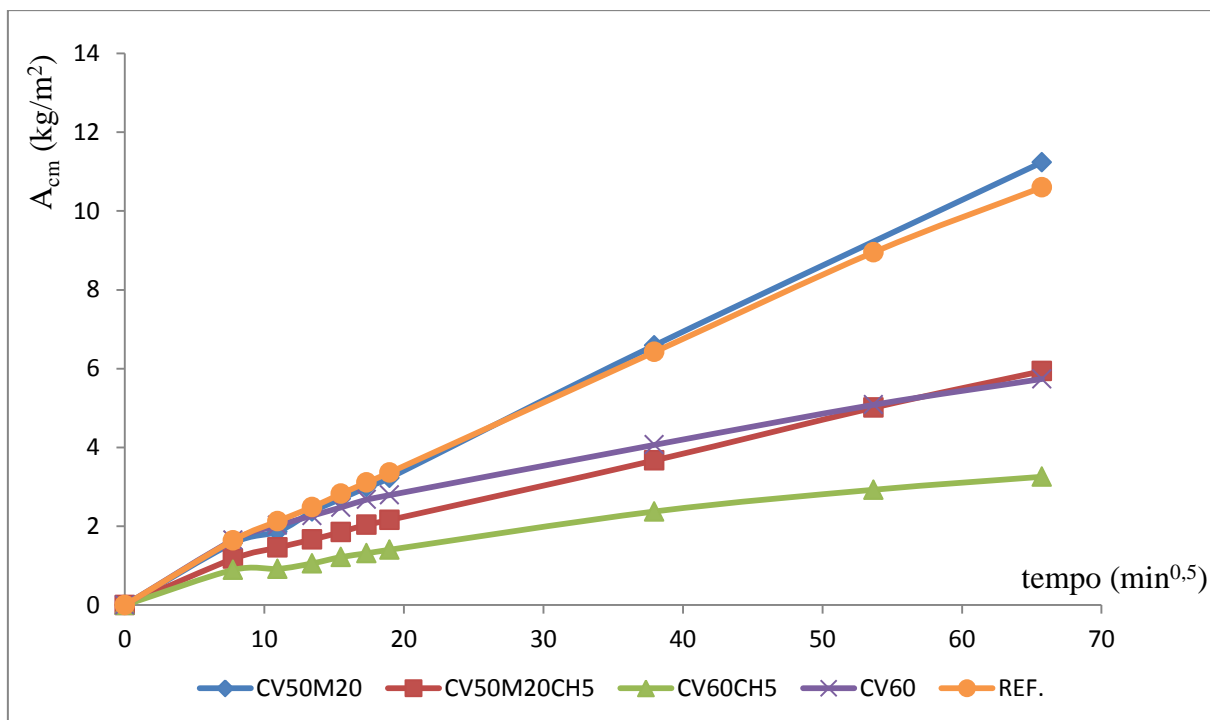


Figura 27 - Curvas de absorção capilar aos 28 dias

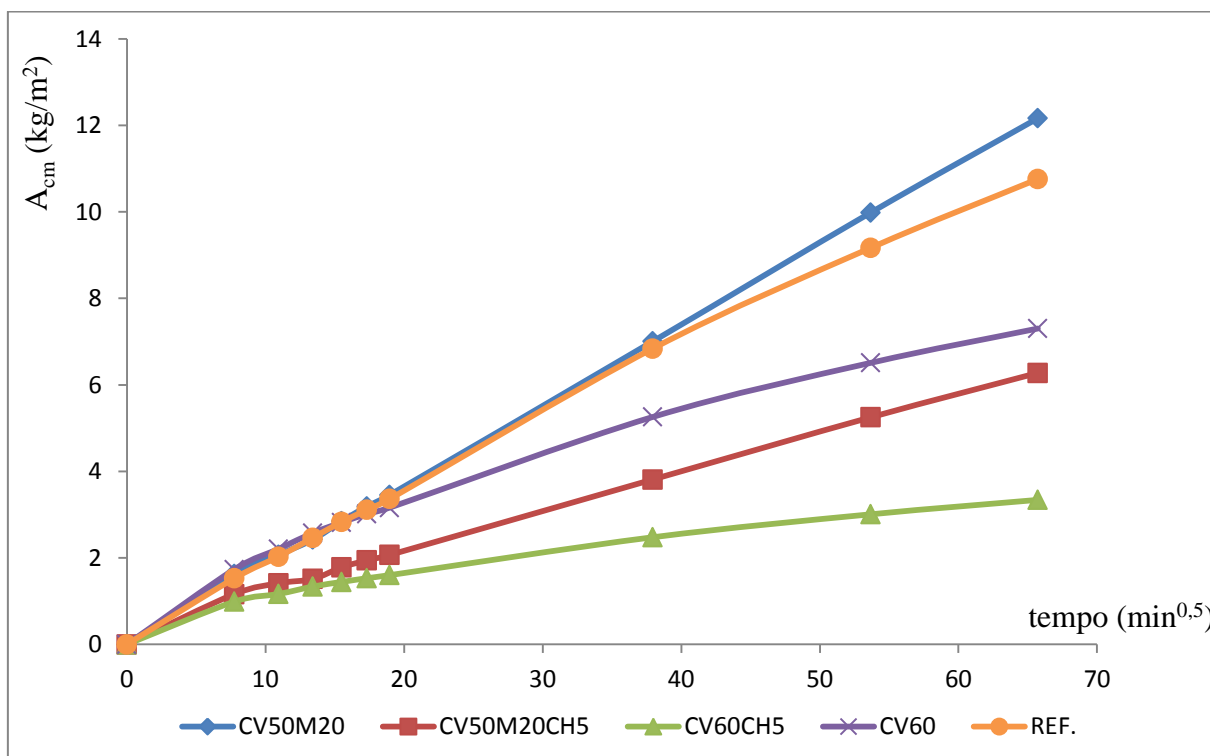


Figura 28 - Curvas de absorção capilar aos 90 dias

Quadro 22 - Coeficientes de absorção capilar e coeficientes de correlação linear

Composição	Idade (dias)	Equação da regressão linear	Coeficiente de absorção capilar	Coeficiente de correlação linear
			C_a (kg/m ² /min ^{0,5})	R_m^2
CV50M20	28	$y = 0,154x + 0,2995$	0,154	0,9893
	90	$y = 0,1658x + 0,2834$	0,1658	0,9943
CV50M20CH5	28	$y = 0,0888x + 0,4826$	0,0888	0,9991
	90	$y = 0,0819x + 0,5013$	0,0819	0,9839
CV60CH5	28	$y = 0,0494x + 0,4435$	0,0494	0,9466
	90	$y = 0,0557x + 0,5647$	0,0557	0,9946
CV 60	28	$y = 0,1028x + 0,8767$	0,1028	0,997
	90	$y = 0,1284x + 0,7892$	0,1284	0,9914
REFERÊNCIA	28	$y = 0,1536x + 0,4443$	0,1536	0,9997
	90	$y = 0,1656x + 0,2381$	0,1656	0,9993

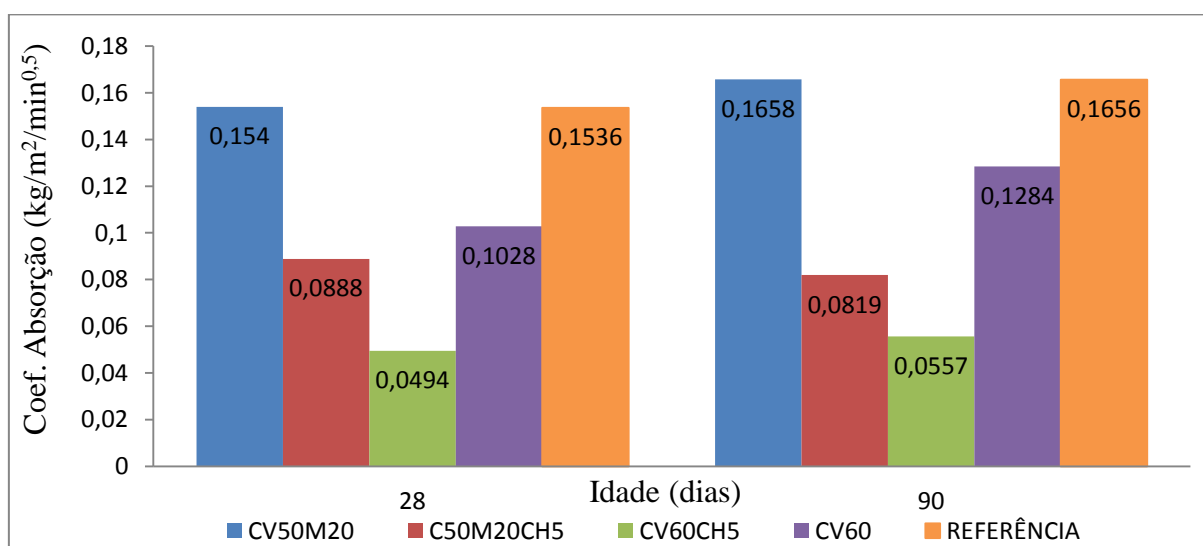


Figura 29 - Representação gráfica dos coeficientes absorção capilar

Da análise das curvas de absorção capilar é possível constatar que, em geral, e para ambas as idades estudadas, o aumento da quantidade de ligante provoca uma diminuição na absorção capilar. A introdução de adições minerais parece contribuir para a diminuição da porosidade capilar, uma vez que a absorção capilar nas composições com adições atingiu níveis inferiores aos da composição de referência, cuja dosagem de ligante bastante é inferior.

As composições que contêm metacaulino não parecem evidenciar uma inclinação decrescente da curva, ao contrário do que acontece com as composições sem o mesmo. Trata-se de um facto estranho, pois seria de esperar que uma maior percentagem de adições com a introdução de 20% de metacaulino, conduzisse a um decréscimo da absorção, uma vez que, sendo o metacaulino um material mais fino e reactivo, deveria conseguir diminuir os poros capilares, originando misturas mais compactas. Isto parece evidenciar que o metacaulino utilizado não possuía um elevado grau de reactividade, nem a finura adequada.

Da observação das curvas de absorção, é possível concluir que a utilização de cal hidratada resulta em decréscimos significativos na absorção capilar. Tal facto pode ficar a dever-se ao aumento da actividade pozolânica por parte da cal hidratada, uma vez que existe mais hidróxido de cálcio disponível para reagir com as pozolanas, logo há mais reacções pozolânicas, resultando num refinamento dos poros, promovendo assim o preenchimento dos vazios e originando misturas mais compactas.

De referir também que para todas as composições, aparentemente os resultados pioram com o avançar do tempo de cura, o que demonstra que ao contrário do que seria suposto, este ensaio não foi sensível ao tempo.

Quanto ao coeficiente de absorção capilar, verifica-se comparativamente com a composição de referência, que este é inferior em todas as outras misturas para ambas as idades. Excepção feita apenas à composição CV50M20, que tem um coeficiente de absorção praticamente igual ao da composição de referência, em ambas as idades.

Observando os coeficientes de absorção aos 28 e 90 dias, verifica-se que as composições contendo cal hidratada (CV50M20CH5 e CV60CH5) apresentam um desempenho muito melhor que a composição de referência, para qualquer percentagem de substituição. Contudo, sem a presença da cal hidratada, as restantes composições (CV50M20 e CV60) aproximam-se da composição de referência, especialmente aos 90 dias.

Quando comparadas todas as composições, verifica-se que as composições ternárias e quaternárias são as que apresentam comportamento mais eficiente, sobretudo na presença da cal hidratada, fruto também da menor razão água/ligante. Contudo, a composição ternária CV50M20 apresenta um comportamento significativamente pior que as restantes

composições, quer sejam binárias ou quaternárias, o que parece indicar que de facto o metacaulino é de fraca qualidade, pouco reactivo e, não conseguindo diminuir os poros capilares e originar misturas mais compactas.

A introdução de cal hidratada e o seu efeito combinado com as cinzas volantes e metacaulino, resulta num material mais eficiente em ambas as idades, mas sobretudo aos 90 dias, o que encontra eco nos ensaios de resistências à compressão.

4.3.2. Absorção de Água por Imersão à Pressão Atmosférica

Como foi referido em 3.3.5.2, o ensaio de absorção de água por imersão foi realizado conforme o descrito na especificação LNEC E394 (1993). Foram ensaiados três provetes cúbicos de 100mm de aresta, aos 28 e 90 dias de idade, sendo que, os resultados do ensaio resultam da média de três leituras individuais da absorção por cada idade e composição. Os resultados obtidos são indicados no Quadro 23, sendo descritos de forma gráfica na Figura 30.

Quadro 23 - Absorção de água por imersão e coeficientes de variação

Composições	Idade (dias)	Absorção de água por imersão	
		A_{im} (%)	Coef. variação (%)
CV50M20	28	14,99	5,89
	90	14,58	1,11
CV50M20CH5	28	13,73	1,09
	90	14,66	2,36
CV60CH5	28	10,75	0,71
	90	10,37	3,56
CV60	28	14,88	2,92
	90	12,66	2,44
REFERÊNCIA	28	16,13	2,15
	90	15,29	2,15

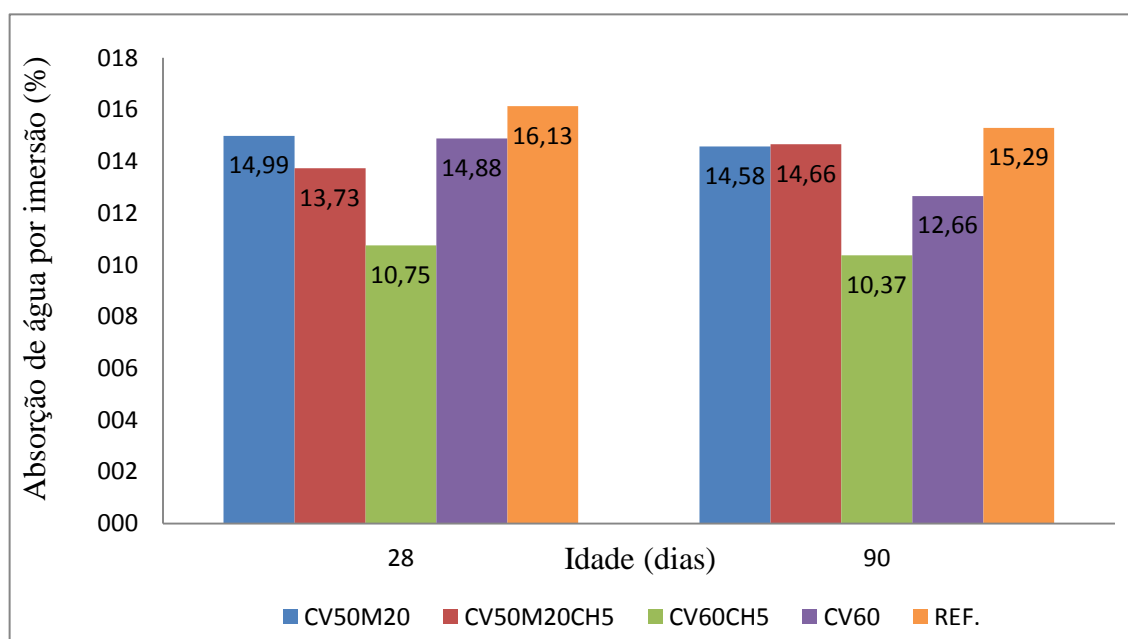


Figura 30 - Absorção de água por imersão aos 28 e 90 dias

Analisando os coeficientes de variação é possível constatar que a dispersão de resultados foi reduzida, uma vez que o coeficiente de variação médio para todas as composições é de 2,44% sendo no máximo 5,89% para a composição CV50M20. Estes valores evidenciam que o recurso a três provetes é suficiente para caracterizar o comportamento do betão relativamente a este parâmetro de durabilidade.

Verifica-se que o aumento da dosagem de ligante acarreta uma diminuição relativamente acentuada do valor da absorção por imersão para ambas as idades, o que está em consonância com o que aconteceu nos ensaios de absorção capilar.

É possível, mais uma vez, verificar o ganho na prestação das composições com a adição de cal hidratada, visto que as composições que contêm cal apresentam percentagens de absorção inferiores às mesmas composições sem a adição de cal. Excepção feita à composição CV50M20CH5 aos 90 dias, parece ter aumentado a sua absorção.

Da análise comparativa dos dois ensaios de absorção é possível concluir que, efectivamente, a cal hidratada parece contribuir para o aumento da quantidade de hidróxido de cálcio disponível para reagir com as adições, havendo aparentemente maior quantidade de produtos

da reacção pozolânica (C-S-H), promovendo assim o preenchimento dos vazios e originando misturas mais compactas com poros de menor diâmetro.

O uso de grandes percentagens de substituição de cimento por cinzas volantes permite evidenciar que o aumento da percentagem de substituição parece originar misturas menos porosas sobretudo para idades mais avançadas. A incorporação de pequenas percentagens de cal hidratada em betões com elevados volumes de cinzas volantes parece originar um efeito benéfico, aumentando a reacção pozolânica, resultando num maior refinamento dos poros, mesmo em idades iniciais.

O uso conjunto destas duas adições permite evidenciar a presença de uma rede porosa mais fechada, constituída por poros de menor diâmetro. Já na presença de metacaulino, a cal hidratada parece não potenciar tanto a redução da absorção, embora aos 28 dias, a composição CV50M20CH5 é a que apresenta a segunda menor taxa de absorção. Contudo, a diferença desta composição para a sua similar sem cal hidratada é bem menor que a diferença da composição com cinzas volantes para a sua similar com cinzas e cal. Trata-se de um facto estranho pois o metacaulino sendo um material pozolânico bastante reactivo deveria contribuir de forma mais acentuada na remoção do hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, o que leva a pensar que o metacaulino utilizado não possuía um elevado grau de reactividade, nem a finura adequada.

4.3.3. Difusão dos Cloretos

A sensibilidade das composições estudadas à penetração de iões de cloro foi avaliada pelo ensaio de migração em regime não estacionário, através do seu coeficiente de difusão em regime não estacionário, de acordo com os procedimentos descritos no documento normativo LNEC E-463 (2004), tal como foi referido em 3.3.5.4.

Inicialmente estava previsto efectuar o ensaio aos 28 e 90 dias de idade, contudo devido a dificuldades na realização do ensaio os resultados aos 28 dias foram descurados uma vez que houve dificuldades em obter leituras convincentes. No sentido de resolver este problema, aos 90 dias de idade optou-se por corrigir a tensão inicial de acordo com o que está descrito na nota do Anexo 2, do documento normativo LNEC E-463.

Assim, com a excepção da composição de referência, a intensidade da corrente inicial das restantes composições, foi corrigida multiplicando-a por um factor de correcção igual à razão entre a dosagem de ligante e respectiva dosagem de cimento para cada composição, de modo a poder usar correctamente o quadro fornecido no Anexo 2 (Quadro 24) do documento normativo referido, o qual indica a diferença de potencial a aplicar, bem como a duração do ensaio. Os factores de correcção utilizados foram de 3.3 e 2.5 para as composições com 30% e 40% de cimento respectivamente.

Quadro 24 - Diferença de potencial e duração do ensaio (adaptado de LNEC E-463, 2004)

Corrente inicial - I_{30V} (mA)	Diferença de potencial aplicada - após ajuste (V)	Nova corrente inicial admissível (mA)	Duração do ensaio (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$50 \leq I_0 < 75$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	20	$60 \leq I_0 < 90$	24

No Quadro 25, são apresentados os valores médios obtidos para o coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário, para além dos respectivos coeficientes de variação. De modo a facilitar a leitura dos resultados, estes também são apresentados sob a forma de gráfico de barras (Figura 31).

Quadro 25 - Resultados do ensaio de difusão dos cloretos por migração

Composição	Idade	Coeficiente de difusão de cloretos	
		D (10^{-12} m ² /s)	Coeficiente de variação (%)
CV50M20	90	7,77	-
CV50M20CH5	90	6,68	2,67
CV60CH5	90	10	7,34
CV60	90	12,69	7,47
REFERÊNCIA	90	32,84	2,5

De referir que para a composição CV50M20, só se conseguiu obter leituras convincentes da penetração dos cloretos para um dos três provetes ensaiados, sendo que, nas composições restantes, foi conseguido efectuar leituras em todos os provetes ensaiados.

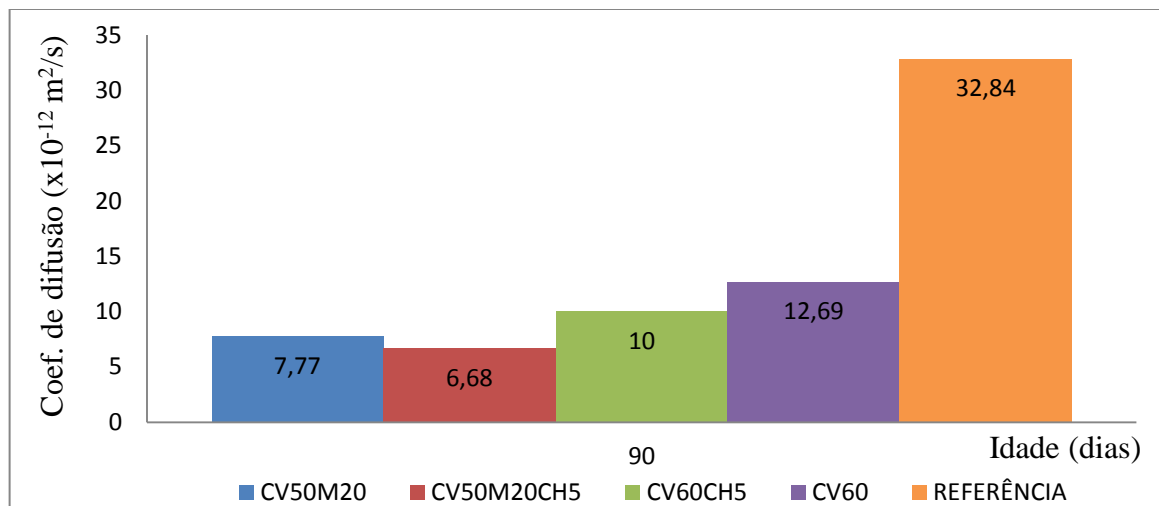


Figura 31 - Coeficiente de difusão dos cloretos por migração

Da análise dos resultados é possível verificar que todas as composições apresentam um comportamento bastante melhor que o da composição de referência, o que permite evidenciar que a inclusão de grandes volumes de adições traz claros benefícios.

A migração dos cloretos através do betão, tal como, a absorção de água por capilaridade ou imersão, é influenciada pela porosidade das matrizes das diferentes composições. Assim, será de esperar que com o aumento da quantidade de ligante e o respectivo decréscimo da razão água/ligante, leve a um decréscimo do coeficiente de difusão de cloretos (Camões, 2002). No que diz respeito às composições estudadas, verificou-se um decréscimo médio a rondar os 70% do coeficiente de difusão com o aumento da dosagem de ligante. Este facto demonstra que o aumento do volume de pasta de ligante e a diminuição da razão água/ligante, produz matrizes mais refinadas, logo menos susceptíveis à penetração de cloretos.

Segundo Ferreira (2000), apesar de ainda não se entender completamente o mecanismo de fixação dos iões de cloro, acredita-se que parte dos cloretos são fixados quimicamente, sendo incorporados nos produtos de hidratação do cimento e uma outra parte é fixada fisicamente, sendo absorvidos na superfície dos micro poros. Apenas uma terceira parte de cloretos, os chamados cloretos livres, é capaz de se deslocar, sendo responsáveis pela destruição da

camada passivante na superfície das armaduras. No sentido de eliminar os chamados, cloretos livres, a introdução de cinzas volantes nas composições desempenha um papel importante, uma vez que estas têm a capacidade de aprisionarem os cloretos. Os resultados obtidos nos ensaios experimentais vão de encontro a este facto, uma vez que, a incorporação de 50 e 60% de cinzas nas composições, produziu melhorias significativas no que respeita à sua resistência à migração de cloretos.

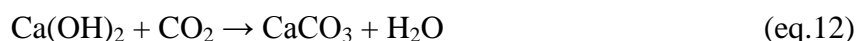
Camões (2002) refere que a maior quantidade de aluminatos proporcionada pela substituição de cimento por cinzas volantes, pode estar na origem do melhor desempenho das composições com cinzas volantes, uma vez que os aluminatos apresentam a capacidade de reagirem quimicamente com os iões de cloro, fixando-os e reduzindo a quantidade de cloretos livres, capazes de migrarem através do betão, o que provoca a diminuição dos respectivos coeficientes de difusão.

Para além do efeito benéfico das cinzas volantes, é possível observar que a introdução de 20% de metacaulino nas misturas, parece potenciar a redução do coeficiente de difusão, face às cinzas volantes. Os resultados mostram que a introdução de 20% de metacaulino nas composições CV50M20 e CV50M20CH5 consegue originar materiais mais eficientes que sem a adição do mesmo, mesmo para composições com mais 10% de cinzas volantes, o que talvez seja explicado pela maior quantidade de aluminatos presentes, uma vez que, o metacaulino utilizado possui cerca de 40% de aluminatos na sua composição.

O efeito benéfico da introdução de metacaulino, bem como das cinzas volantes, parece ser majorado pela adição de apenas 5% (massa do ligante) de cal hidratada, demonstrando a eficiência do uso de adições. Se fizermos um estudo da variação do coeficiente de difusão relativamente à composição binária, CV60, verifica-se que as misturas ternárias CV60CH5 e CV50M20 apresentam ganhos que vão dos 21% até aos 38% respectivamente. Já a composição quaternária apresentam um ganho ainda maior, sendo ele de 47%, o que demonstra a excelente sinergia proporcionada pela adição conjunta de cinzas volantes, metacaulino e cal hidratada.

4.3.4. Carbonatação

Segundo Ferreira (2000), a carbonatação é o processo pelo qual o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera reage na presença de humidade com os minerais do cimento hidratado. O dióxido de carbono reage, principalmente, com o material hidratado, nomeadamente o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para formar carbonato de cálcio (CaCO_3), segundo a seguinte reacção:



Na realidade, o agente agressivo é o ácido carbónico uma vez que o dióxido de carbono gasoso não é reactivo. A reacção química acima descrita poderá ocorrer em três fases. Na primeira fase, o dióxido de carbono difunde-se para o interior do betão. Na segunda fase, o dióxido de carbono reage com as moléculas de água, e numa terceira fase, o produto resultante, ácido carbónico, reage com os componentes alcalinos do betão (Ferreira, 2000).

A carbonatação desenvolve-se progressivamente a partir do exterior do betão exposto ao CO_2 para o seu interior, sendo que, à medida que vai penetrando o betão a sua velocidade torna-se cada vez mais lenta, uma vez que o CO_2 tem que se difundir através do sistema de poros, incluindo a superfície já carbonatada (Ferreira, 2000). A difusão do dióxido de carbono através da microestrutura do betão depende do grau de saturação dos capilares, sendo máxima quando os poros estão secos e mínima quando os poros estão saturados (Filho, 2008).

Em termos de durabilidade das estruturas de betão, a importância da carbonatação, reside no facto de esta, reduzir o pH da água no betão endurecido de valores entre 12,6 a 13,5 para valores inferiores a 9, o que faz desaparecer a camada passivante, deixando as armaduras sujeitas às reacções com o oxigénio e a água, as quais eliminam a camada de óxido protectora, ocorrendo a corrosão. Quando todo o hidróxido de cálcio estiver carbonatado, o valor do pH fica reduzido a valores aproximadamente iguais a 8,3.

Neste trabalho, a profundidade de carbonatação, foi avaliada através de ensaios de carbonatação acelerada, de acordo com o descrito na especificação técnica FprCEN/TS 12390-12 (2010).

A profundidade média e máxima de carbonatação das diferentes composições, bem como os respectivos coeficientes de variação, são apresentados no Quadro 26. A profundidade de carbonatação, foi medida após pulverização de uma solução alcoólica de fenolftaleína na superfície exposta do betão, a qual reage com o hidróxido de cálcio livre tornando-se cor-de-rosa, enquanto as partes carbonatadas permanecem incolores. As medições da profundidade de carbonatação foram efectuadas após os seguintes períodos de exposição: 28, 56, 63, 70 e 90 dias.

Quadro 26 - Resultados do ensaio de carbonatação acelerada

Composições	Idade (dias)	Prof. média (mm)	Coef.Variação (%)	Prof. máxima (mm)
CV50M20	28	22,9	8,72	26,4
	56	31,48	6,08	33,8
	63	35,12	13,47	42,1
	70	35,06	8,33	42,5
	90	40,71	7,45	47,4
CV50M20CH5	28	16,44	12,6	20,7
	56	23,92	9,65	27,8
	63	25,56	7,85	28,7
	70	26,02	9,28	29,15
	90	31,31	4,11	34,51
CV60CH5	28	12,34	11,91	15,6
	56	17,26	13,46	20,1
	63	19,54	13,5	22,45
	70	20,88	8,81	23,52
	90	28,57	11,98	33,4
CV60	28	22,96	5,32	25,1
	56	30,35	5,46	33,55
	63	31,66	5,44	36,4
	70	33,37	4,56	37,81
	90	38,98	10,51	46,8
REFERÊNCIA	28	8,74	16,49	12,1
	56	13,77	16,48	17,65
	63	13,81	15,45	16,85
	70	14,33	7,73	16,5
	90	16,3	5,35	17,75

Na Figura 32, por forma a facilitar a leitura dos resultados é, apresentado de forma gráfica a profundidade média de carbonatação das diferentes composições.

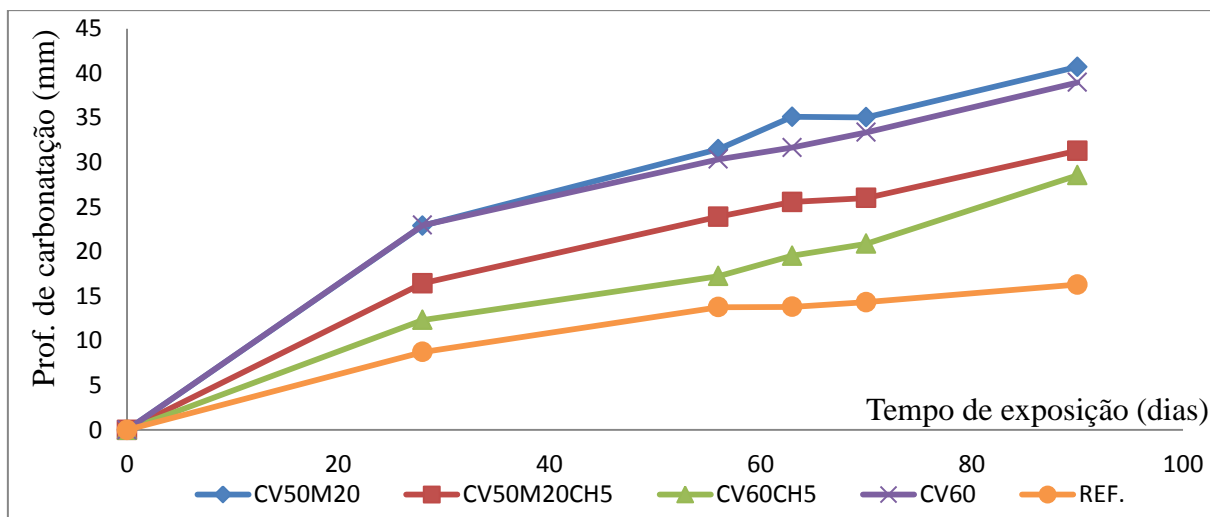


Figura 32 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de carbonatação acelerada

Analisando os valores obtidos no ensaio de carbonatação acelerada, verifica-se que o uso de grandes volumes de adições minerais provoca um aumento significativo da profundidade de carbonatação, especialmente com o avançar da idade, quando comparado com a composição de referência, o que vai de encontro aos resultados obtidos por outros autores citados por Filho (2008). É possível observar, também, que a profundidade de carbonatação aumentou com o aumento da percentagem de substituição de cimento por adições pozolânicas.

A substituição parcial de cimento por adições pozolânicas é caracterizada pela eficiência da reacção pozolânica, no que diz respeito ao preenchimento dos espaços capilares, o que propicia a redução da conectividade dos poros capilares, originando uma microestrutura mais densa, melhorando assim a sua impermeabilidade. Seria de esperar, portanto, que estas melhorias microestruturais conduzissem a uma menor profundidade de carbonatação por parte dos betões contendo adições, contudo tal facto não se verifica, o que parece indicar que a propensão à carbonatação do betão está directamente relacionada com a permeabilidade do sistema poroso. E é favorável. Mas, as misturas com adições possuem menos hidróxido de cálcio, logo menor quantidade de CO_2 é suficiente para reagir como o pouco hidróxido de cálcio e, assim, reduzir o pH para níveis “perigosos” destruindo a camada passivante. Ao que tudo indica o efeito desfavorável é mais importante, e quantificam-te que o efeito favorável. Segundo Ferreira (2000), o principal factor que controla a carbonatação, é a difusividade da pasta de cimento endurecido, sendo a difusividade função do sistema poroso, o tipo de cimento, a razão água/ligante e o teor de humidade são factores importantes.

Quando comparadas as composições com adição de cal hidratada (CV50M20CH5 e CV60CH5), com as suas similares sem a adição da mesma (CV50M20 e CV60), verifica-se que a adição de cal hidratada parece potenciar a redução da profundidade de carbonatação. A utilização de cal hidratada providencia uma fonte externa de hidróxido de cálcio, mostrando-se eficiente em repor parcialmente a cal consumida, dificultando a redução do pH, funcionando como uma reserva de alcalinidade, mitigando, assim, um dos efeitos adversos da adição de grandes volumes de cinzas volantes: a carbonatação.

Actualmente, é admitido na generalidade da bibliografia que a carbonatação natural varia proporcionalmente com a raiz quadrada do tempo, sob condições de humidade constantes, podendo ser expressa segundo a seguinte equação:

$$x = K_c \times \sqrt{T} \tag{eq.13}$$

em que:

K_c - representa o coeficiente de carbonatação (mm/dia^{0.5});

T - representa o tempo de exposição em dias.

A espessura carbonatada pode, então, ser expressa em função da raiz quadrada do tempo de exposição, em dias, resultando numa tendência linear, conforme o demonstrado na Figura 33.

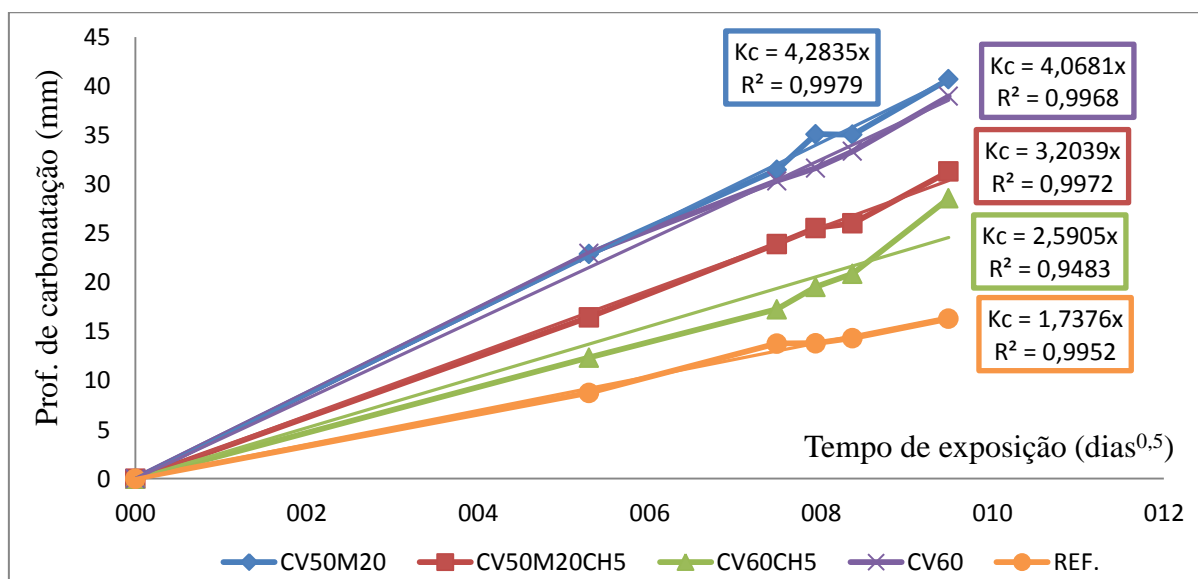


Figura 33 - Coeficiente de carbonatação

Pode-se observar que o coeficiente de carbonatação do betão de referência, $1,74 \text{ mm/dia}^{0,5}$, é inferior aos coeficientes das restantes misturas produzidas, o que comprova que a incorporação de adições dá origem a betões menos resistentes à penetração de CO_2 .

Da análise dos diferentes coeficientes de carbonatação verifica-se que a adição de cal hidratada, reduz consideravelmente o coeficiente de carbonatação das composições nas quais foi adicionada (especialmente sem a presença do metacaulino), quando comparado com as composições similares, sem adição da mesma. A adição de cal hidratada ao betão provoca um aumento do teor remanescente de hidróxido de cálcio, o que se traduziu numa redução do coeficiente de carbonatação em cerca de 36% para a composição sem metacaulino (CV60CH5) e 25% para a composição com metacaulino (CV50M20CH5). Apesar da redução, a resistência à carbonatação da composição de referência foi superior, sendo que, com maior incorporação de cal talvez, se consiga aproximar os desempenhos dos betões.

Segundo Filho (2008), a previsão da durabilidade do betão no que diz respeito à carbonatação, baseado no ensaio acelerado, requer cautela, pois a microestrutura é alterada progressivamente com a evolução das reacções de hidratação, principalmente em betões com altos teores de cinzas volantes. A actividade pozolânica ocorre lentamente e, com o passar dos anos, grande parte dos poros capilares podem ser substituídos por mesoporos.

Já para Younsi et al. (2011), os resultados dos ensaios de carbonatação acelerada não são apenas governados pela microestrutura do betão mas, também, pela quantidade de hidróxido de cálcio presente e pelo grau de saturação dos poros.

4.3.5. Resistividade Eléctrica

A resistividade eléctrica foi avaliada através de uma sonda Wenner, os resultados obtidos são apresentados em seguida e resultam da média aritmética de quatro leituras, as quais, foram efectuadas na diagonal do provete e perpendicularmente entre si em duas faces distintas.

Os resultados obtidos no ensaio de resistividade eléctrica são apresentados no Quadro 27, sendo descritos de forma gráfica na Figura 34.

Quadro 27 - Resultados do ensaio de resistividade eléctrica

Composições	Idade (dias)	Resistividade ($\Omega.m$)	Coef. Variação (%)
CV50M20	3	21,50	11,07
	7	43,00	4,25
	14	176,75	3,34
	21	297,00	5,25
	28	389,50	7,42
	70	643,25	5,59
	90	697,00	1,36
CV50M20CH5	3	26,25	3,65
	7	51,50	4,04
	14	107,75	2,67
	21	160,00	0,88
	28	223,75	1,18
	70	419,75	2,48
	90	535,00	3,40
CV60CH5	3	18,00	4,54
	7	22,25	2,25
	14	39,50	3,27
	21	53,00	1,54
	28	76,75	2,23
	70	144,00	2,04
	90	200,50	2,06
CV60	3	18,50	3,12
	7	19,75	2,53
	14	36,25	1,38
	21	46,50	4,48
	28	57,75	3,57
	70	135,00	4,91
	90	301,50	2,43
REFERÊNCIA	3	-	-
	7	26,00	4,44
	14	31,50	4,10
	21	35,00	2,33
	28	37,75	2,54
	70	43,75	2,88
	90	45,50	2,84

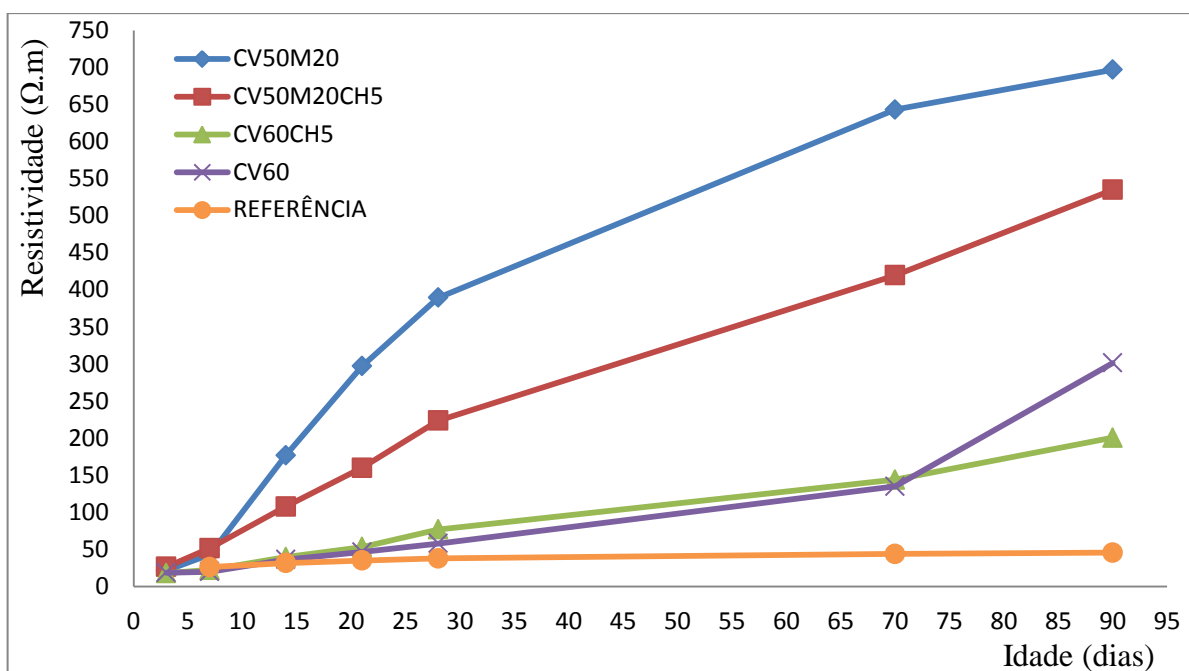


Figura 34 - Resistividade eléctrica dos provetes até aos 90 dias

Como seria de esperar, todas as composições possuem resistividade eléctrica superior à composição de referência, indicando assim, que a substituição parcial de cimento por adições pozolânicas contribui para o acréscimo da resistividade dos betões, aumentando a compacidade das misturas e reduzindo, assim, o conseqüente risco de corrosão.

Ao contrário da composição de referência, as restantes composições evidenciam uma resistividade crescente com o tempo de cura, especialmente na presença de metacaulino. Até aos 7 dias de cura, a resistividade eléctrica não varia muito entre as diferentes composições, contudo a partir desta idade, a sinergia entre o metacaulino e as cinzas parece potenciar de forma acentuada a sua resistividade.

Já no caso das composições sem metacaulino, o ganho de resistividade é menos pronunciado, sendo que, apenas depois dos 28 dias apresenta ganhos mais pronunciados, este facto parece ser indicativo da menor reactividade pozolânica das cinzas volantes. Tal como no ensaio de difusão de cloretos, verifica-se que as composições com metacaulino são as que apresentam os melhores resultados, o que permite evidenciar o efeito potenciador do metacaulino face à mistura binária.

Perante os resultados obtidos e segundo Torgal & Jalali (2010) de acordo com o Comité Euro-Internacional du Beton – CEB 192 (Quadro 28), é possível referir que a composição de referência apresenta um risco muito elevado da corrosão das suas armaduras devido à sua baixa resistividade. Já as restantes composições vão diminuindo o risco de corrosão com o tempo de cura, sendo que as composições com metacaulino aos 14 dias já apresentam um baixo risco de corrosão, o que nas composições com cinzas apenas acontece aos 70 dias de idade. Todas as composições estudadas aos 90 dias apresentam um risco muito baixo de corrosão das suas armaduras.

Como este parâmetro está associado ao início da corrosão das armaduras, a utilização de betões com cinzas e metacaulino é uma boa opção para o seu impedimento (Torgal & Jalali, 2010), embora com o decorrer do tempo todas as misturas produzidas apresentam resultados satisfatórios.

Quadro 28 - Risco de corrosão de acordo com a resistividade

Resistividade ($\Omega.m$)	Risco de Corrosão
< 50	Muito Elevada
50 - 100	Elevada
100 - 200	Baixa
> 200	Muito Baixa

5. CONCLUSÕES

Findado o todo o processo, desde a preparação e planeamento da campanha experimental, à análise dos resultados obtidos, pode dizer-se que esta dissertação se contabiliza por um saldo positivo e promissor. Os objectivos propostos foram cumpridos na sua generalidade, deixando abertas algumas portas para desenvolver futuras investigações.

5.1. Principais Conclusões

Após a análise crítica dos resultados no capítulo anterior, destacam-se as conclusões mais relevantes do estudo efectuado:

É possível produzir betões com elevados volumes de cinzas volantes e pequenas percentagens de metacaulino e cal hidratada com desempenhos mecânicos e de durabilidade adequados à maioria das infra-estruturas correntes, a um custo bem mais reduzido que o preconizado actualmente pelo betão corrente. Prova-se, portanto, que é efectivamente possível reduzir substancialmente o consumo de cimento a nível global e os negativos impactos ambientais associados ao seu consumo, para além, de se reaproveitar um subproduto industrial que, de outro modo, seria depositado em aterro, podendo ser foco de poluição.

Há evidências de se conseguir produzir misturas binárias, ternárias e mesmo quaternárias, com elevados volumes de cinzas e, fracções reduzidas de metacaulino e cal hidratada, com razões água/ligante muito baixas (0,35 e 0,33) com a ajuda de um superplastificante. Estas misturas revelaram possuir excelente trabalhabilidade, cumprindo os requisitos necessário à sua classificação como betão auto-compactável.

A incorporação de cal hidratada nas misturas parece ter um efeito benéfico, quer em termos de resistência à compressão, potenciando-a, quer em termos de durabilidade, através da redução da permeabilidade e coeficientes de absorção, fruto de uma microestrutura mais compacta, resultante da maior quantidade de hidróxido de cálcio disponível para as reacções

pozolânicas. As misturas com incorporação de cal (CV50M20CH5 e CV60CH5) apresentam melhores resultados quando comparadas com as misturas similares sem a adição da mesma.

Verifica-se também que a cal hidratada parece ainda conseguir mitigar o efeito adverso das cinzas volantes no que toca à carbonatação, reduzindo as profundidades de carbonatação, bem como a velocidade a que a mesma ocorre, sendo que este efeito é mais visível em idades tardias. Globalmente, verifica-se que parece existir uma excelente sinergia entre as cinzas volantes e cal hidratada, uma vez que, a composição CV60CH5 é a que apresenta os melhores resultados globais, o que pode ser explicado pelo aumento da actividade pozolânica proporcionado pela adição de cal hidratada.

A introdução de metacaulino nas misturas parece ter um efeito benéfico no que concerne à resistência dos betões à penetração de cloretos. Tal facto, pode ficar a dever-se ao aumento da quantidade de aluminatos, para além dos proporcionados pelas cinzas volantes. O facto de o metacaulino utilizado possuir cerca de 40% de aluminatos na sua composição, pode explicar este facto, uma vez que os aluminatos têm a capacidade de reagir quimicamente com os iões cloro, fixando-os e reduzindo a quantidade de cloretos livres, os quais podem migrar através do betão e provocarem a corrosão das armaduras.

Contudo, seria de esperar que o metacaulino tivesse maior influência na correcção da resistência à compressão das misturas produzidas, sobretudo nas idades iniciais, o que parece revelar que o metacaulino utilizado não possuía grande reactividade, possivelmente por a sua temperatura de cozedura ou mesmo a sua granulometria não ser a mais adequada.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

A temática abordada por esta dissertação não se esgotou e, possivelmente, será alvo de desenvolvimentos futuros, pelo que são sugeridos em seguida alguns tópicos, que se crêem válidos, para preencher algumas lacunas no conhecimento actual sobre a temática abordada.

Seria interessante avaliar qual a eficiência da incorporação de maiores quantidades de cal hidratada nas misturas, procurando despistar através de várias percentagens de substituição, qual a percentagem óptima de cal hidratada a incorporar nas misturas de modo a que se possa otimizar o seu desempenho.

Outra questão interessante prende-se com a necessidade de avaliar se a cal hidratada é, ou não, lixiviada durante o processo de cura dos betões. É importante avaliar este aspecto, pois a lixiviação da cal hidratada provoca o aumento dos vazios, para além de esta não ser utilizada na sua totalidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azevedo, F. (2011), *Reaproveitamento de resíduos de pneus em betões de elevado desempenho*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.

Aggarwal, V., Gupta, S.M., Sachdeva, S.N. (2010), *Concrete Durability – Through High Volume Fly Ash Concrete, A Literature review*, International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(9), 4473-4477.

Aguiar, J. B. (2000), *Apontamentos da disciplina de Materiais de Construção*, Universidade do Minho, Guimarães.

Atiş, C.D. (2002), *Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash*, Construction and Building Materials.

Burden, D. (2006), *Durability of Concrete Containing High Levels of Fly Ash*, Master of Science in Engineering Thesis, University of New Brunswick, United States of America.

Camões, A. (2005), *Betões de elevado desempenho com elevado volume de cinzas volantes*, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães.

Camões, A. (2006), *Betões de elevado desempenho*, Seminário Inovação em Betões.

Camões, A. (2010), *Betão eco-eficiente com reduzido teor de cimento*, Universidade do Minho, Guimarães.

Crouch, L.K., Hewitt, R., Byard, B. (2007), *High Volume Fly Ash Concrete*, World of Coal Ash, Northern Kentucky, United States of America.

Eight CANMET/ACI (2004), *International Conference on Flyash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete - Supplementary Papers*, Las Vegas, United States of America.

Ferreira, R. M. (2000), *Avaliação de Ensaios de Durabilidade do Betão*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.

Filho, J.H. (2002), *Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigénio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

Filho, J.H. (2008), *Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto*, Tese de Doutoramento, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

FprCENTS 12360-12 (2010), *Testing hardened concrete – Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method*.

Gomes, P.C.C., de Barros, A.R. (2009), *Métodos de dosagem de concreto autoadensável*, Editora Pini, Ltda.

International Energy Agency, World Business Council for Sustainable Development (2009), *Cement Technology Roadmap 2009 – Carbon emissions reductions up to 2050*.

LNEC E-393 (1993), *Betão - Determinação da absorção de água por capilaridade*, Documentação normativa, Especificação LNEC.

LNEC E-394 (1993), *Betão - Determinação da absorção de água por imersão*, Documentação normativa, Especificação LNEC.

LNEC E-463 (2004), *Betão – Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário*, Documentação normativa, Especificação LNEC.

Malhotra, V.M., Metha, P.K. (2002), *High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete*, Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, Ottawa, Canada

Metha, P.K., Monteiro, P.J.M. (2006), *Concrete – Microstructure, Properties and Materials*, Third Edition, McGraw-Hill Companies, Inc.

Mehta, P.K. (2004), *High-Performance – High volume fly ash concrete for sustainable development*, International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology.

Meyer, C. (2008), *The greening of the concrete industry*, Cement & Concrete Composites.

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

NP EN 206-1 (2005), *Betão - Parte 1: especificação, desempenho, produção e conformidade*.

NP EN 206-9 (2010), *Betão - Parte 9: Regras adicionais para betão auto-compactável*.

NP EN 450-1 (2006), *Cinzas volantes para betão - Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade*.

NP EN 450-2 (2006), *Cinzas volantes para betão - Parte 2: Avaliação da conformidade*

NP EN 459-1 (2002), *Cal de construção – Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*.

NP EN 933-1 (2000), *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração*.

NP EN 933-2 (1999), *Ensaaios para determinação das características geométricas dos agregados – Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica – Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas.*

NP EN 12350-8 (2010), *Ensaaios do betão fresco – Parte 8: Betão auto-compactável – Ensaio de espalhamento.*

NP EN 12350-9 (2010), *Ensaaios do betão fresco – Parte 9: Betão auto-compactável – Ensaio de escoamento no funil V.*

NP EN 12350-10 (2010), *Ensaaios do betão fresco – Parte 10: Betão auto-compactável - Ensaio de escoamento na caixa L.*

NP EN 12350-12 (2010), *Ensaaios do betão fresco – Parte 12: Betão auto-compactável - Ensaio de espalhamento no anel J.*

NP EN 12390-1 (2003), *Ensaaios do betão endurecido - Parte 1: Formas e dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e dos moldes.*

NP EN 12390-2 (2003), *Ensaaios do betão endurecido - Parte 2: Execução e cura dos provetes para os ensaios de resistência mecânica.*

NP EN 12390-3 (2003), *Ensaaios do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio.*

Okamura, H., Ouchi, M. (2003), *Self-Compacting Concrete*, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, Nº 1.

Reis, R. (2009), *Betões Eco-Eficientes com Cinzas Volantes e Metacaulino*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.

Reis, R., Camões, A. (2010), *Misturas ternárias eco-eficientes com incorporação de cinzas volantes e metacaulino*, Encontro Nacional de Betão Estrutural.

Sampaio, J., Coutinho, J.S., Sampaio, M.N. (2001), *Melhoria do desempenho de betões pelo metacaulino*, 43º Congresso Brasileiro do Concreto.

Schneider, M., Romer, M., Tschundin, M., Bolio, H. (2011), *Sustainable cement production – present and future*, Cement and Concrete Research.

Silva, P., de Brito, J. (2009), *Betão auto-compactável (BAC) – estado actual do conhecimento*, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Sixth CANMET/ACI (2004), *International Conference on Durability of Concrete.*

Sousa, S. P. (2005), *Betão Eco-Eficiente com Cinzas de Casca de Arroz*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Sumer, M. (2012), *Compressive strength and sulfate resistance properties of concretes containing Class F and Class C fly ashes*, Construction and Building Materials.

Taylor, M., Tam, C., Gielen, D. (2006), *Energy Efficiency and CO₂ Emissions from the Global Cement Industry*, International Energy Agency.

Tejo Energia (2010), *Sumário 2010 – Segurança e Ambiente*.

Torgal, F. P., & Jalali, S. (2010), *A Sustentabilidade dos Materiais de Construção*, Tecminho, Guimarães.

Younsi, A., Turcry, P., Rozière, E., Aït-Mokhtar, A., Loukili, A. (2011), *Performance-based design and carbonation of concrete with fly ash content*, Cement and Concrete Composites.