



**Ana Vera Pereira  
Abrantes**

**Comportamento do betão de cal hidráulica aditivado  
com metacaulino**



**Ana Vera Pereira  
Abrantes**

**Comportamento do betão de cal hidráulica aditivado  
com metacaulino**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Doutora Ana Velosa, Professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação científica do Doutor Paulo Cachim, Professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais e irmão, pois sempre me apoiaram em todos os desafios que surgiram ao longo do meu percurso acadêmico. Muito obrigada, sem vocês nada disto seria possível.

## **o júri**

presidente

**Professora Doutora Margarida João Fernandes De Pinho Lopes**  
professora auxiliar da Universidade de Aveiro

**Professor Doutor Fernando Joaquim Fernandes Tavares Rocha**  
professor Catedrático da Universidade de Aveiro

**Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa**  
professora auxiliar da Universidade de Aveiro

**Professor Doutor Paulo Barreto Cachim**  
professor associado da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

A elaboração desta tese de mestrado só foi possível graças à contribuição de inúmeras pessoas, que de forma directa ou indirecta me apoiaram e incentivaram a percorrer este caminho.

À Professora Ana Luísa Velosa, por toda a motivação, orientação, disponibilidade, linhas orientadoras e partilha de conhecimentos ao longo de todo o trabalho.

Ao Professor Paulo Cachim pela coorientação, pela disponibilidade e sentido crítico.

À Eng.<sup>a</sup> Maria Carlos Figueiredo do laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro pela disponibilidade, apoio e partilha de conhecimentos essenciais para o melhor desempenho da componente laboratorial neste trabalho.

Ao Vitor Rodrigues e ao Eng.<sup>o</sup> João Festas por toda a ajuda e disponibilidade prestada no decorrer dos trabalhos laboratoriais.

Aos meus amigos, que tiveram sempre ao meu lado durante este percurso académico apoiando e proporcionando os melhores momentos de descontração possíveis.

Agradeço em especial ao João Bernardo, Bruno Castro, Catarina, Bruno Pereira, Eduardo, Vanessa, Bruno Le, Frederico, Gonçalo e Hugo pelos momentos inesquecíveis que proporcionaram.

A toda a minha família pois mesmo ausentes sempre me apoiaram e incentivaram durante todo este caminho.

Aos meus pais, pelo apoio, motivação, compreensão e por nunca deixarem de acreditar. Não chegam as palavras para expressar tudo aquilo que já fizeram e ainda fazem por mim. Muito obrigada.

Ao meu irmão pela amizade, apoio, compreensão e por todos os momentos de diversão.



**palavras-chave**

Comportamento do betão, cal hidráulica, metacaulino, resistência compressão, módulo de elasticidade, carbonatação, resistência à penetração de cloretos.

**resumo**

Actualmente o betão é um dos materiais mais utilizados na construção, da sua produção e dos seus constituintes resultam uma série de processos que contribuem para a degradação ambiental. A crescente consciencialização para a necessidade de amenizar a deterioração ambiental leva a um aumento da procura de materiais cujo impacto ambiental seja o menor possível.

A cal hidráulica tem um impacto ambiental significativamente inferior ao evidenciado pelo cimento Portland, uma vez que na produção deste material a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido é muito inferior à originada na produção de cimento Portland. O betão de cal hidráulica pode ser um material com interesse comercial para aplicações onde as exigências estruturais não sejam muito elevadas. A utilização de metacaulino como adição pozolânica tem o propósito de potencializar a capacidade resistente do betão de cal hidráulica com o intuito de aumentar a sua viabilidade e consequente empregabilidade em obra.

Este trabalho tem como principal objectivo a avaliação do comportamento do betão de cal hidráulica aditivado com metacaulino português. O betão foi submetido a diversos ensaios com a finalidade de analisar determinadas propriedades, tendo sido alvo de análise a trabalhabilidade, o módulo de elasticidade, a resistência à compressão, a resistência à carbonatação e a resistência à penetração de cloretos. Os ensaios foram realizados em provetes de diferentes idades com o intuito de avaliar a evolução destas propriedades ao longo do tempo.

Os resultados obtidos vão de encontro aos resultados já apresentados em estudos anteriores, apresentando o betão com substituição parcial de cal hidráulica em 20% por metacaulino o melhor desempenho relativamente à rigidez, à resistência mecânica e à resistência de carbonatação. Todas estas propriedades apresentam uma melhoria com o aumento de idade do betão, sendo esta melhoria mais evidente nos provetes com adição de metacaulino.

Relativamente à resistência à penetração de cloretos, a partir dos resultados aos 28 dias, pode-se concluir que no betão de cal hidráulica a adição de metacaulino tem um efeito benéfico na diminuição da difusão de iões cloreto, indo estes resultados de encontro aos já apresentados na literatura existente relativa ao betão de cimento.

**keywords**

Concrete behavior, hydraulic lime, metakaolin, compressive strength, modulus of elasticity, carbonation, resistance to chloride penetration.

**abstract**

Presently concrete is one of the main materials used in construction, resulting from its production and its constituents a series of processes that contribute to environmental degradation. The increasing awareness of the need to mitigate environmental degradation, leads to an increasing demand on materials with a lower environmental impact.

The environmental impact of hydraulic lime is significantly lower than that evidenced by the portland cement, since the CO<sub>2</sub> emissions in lime production process is lower than that originated in Portland cement production. Concrete with a hydraulic lime binder could have commercial interest in constructions with lower structural strength demands. In order to increase mechanical strength, metakaolin is used as a pozzolanic addition, with the intention to increase its viability and consequent employability in construction..

The main goal of this work is to evaluate the behaviour of the hydraulic lime concrete with the addition of Portuguese metakaolin. The concrete was submitted to several tests in order to analyse certain properties, such as: the analysis of workability, modulus of elasticity, compressive strength, resistance to carbonation and to chloride penetration. Tests were carried out on specimens of different ages in order to assess the evolution of these properties over time.

Obtained results meet other results already presented in previous studies, the concrete with partial substitution of hydraulic lime by 20% metakaolin had the best performance relative to stiffness, mechanical strength and resistance to carbonation. All these properties show an improvement over time, presenting the specimens with metakaolin addition the most evident improvements.

From the results at 28 days, regarding the resistance to chloride penetration, it may be concluded that in hydraulic lime concrete the addition of metakaolin has a beneficial effect in reducing the diffusion of chloride ions. These results meet the results already presented in the literature related to cement concrete.

“On résiste à l'invasion des armées; on ne résiste pas à l'invasion des idées.”

**Victor Hugo**





## Índice geral

1. Introdução.....	1
1.1. Considerações gerais .....	1
1.2. Enquadramento e justificação do tema .....	2
1.3. Objectivos e metodologia de investigação .....	3
1.4. Estrutura da dissertação .....	4
2. Considerações acerca das matérias-primas e o seu contributo no comportamento do betão .....	7
2.1. Agregados .....	8
2.2. Cal hidráulica como material ligante.....	9
2.3. Metacaulino .....	12
2.4. Água de amassadura.....	14
2.5. Superplastificantes.....	14
3. Influência da adição de material pozolânico no comportamento do betão de cal hidráulica .....	17
3.1. Comportamento do betão de cal hidráulica com adição de resíduos de argila expandida.....	18
3.1.1. Propriedades do betão enquanto fresco.....	18
3.1.2. Propriedades do betão endurecido .....	18
3.1.2.1. Resistência à compressão.....	18
3.1.2.2. Reactividade pozolânica .....	20
3.1.3. Principais conclusões sobre o comportamento do betão de cal hidráulica aditivado com resíduos de argila expandida.....	20
3.2. Comportamento do betão de cal hidráulica aditivado com metacaulino português.....	21
3.2.1. Propriedades do betão enquanto fresco.....	21
3.2.2. Propriedades do betão quando endurecido .....	21
3.2.2.1. Resistência à compressão.....	21
3.2.2.2. Reactividade pozolânica .....	22
3.2.3. Principais conclusões.....	23
3.3. Comportamento do betão de cimento portland aditivado com metacaulino .....	23
3.3.1. Propriedades do betão enquanto fresco.....	23
3.3.2. Propriedades do betão endurecido .....	24
3.3.2.1. Módulo de elasticidade .....	24
3.3.2.2. Resistência à compressão.....	24
3.3.3. Durabilidade .....	25
3.3.3.1. Resistência à carbonatação .....	25
3.3.3.2. Resistência à penetração de cloretos .....	26

3.3.3.3. Resistência aos sulfatos .....	27
4. Durabilidade do betão .....	29
4.1. Importância do estudo da durabilidade do betão .....	29
4.2. Resistência à carbonatação .....	30
4.3. Resistência à penetração de cloretos .....	31
5. Sistematização e justificação dos materiais utilizados e da metodologia do produção de betão .....	33
5.1. Composição do betão .....	34
5.1.1. Materiais utilizados .....	35
5.1.1.1. Agregados .....	35
5.1.1.2. Cal Hidráulica (NHL5) como ligante .....	36
5.1.1.3. Metacaulino como adição pozolânica.....	37
5.1.1.4. Superplastificante.....	38
5.1.2. Misturas realizadas .....	39
5.2. Produção do betão.....	39
5.3. Colocação do betão em moldes e vibração .....	40
5.4. Acondicionamento dos provetes .....	41
6. Sistematização e justificação dos ensaios realizados.....	43
6.1. Ensaio de abaixamento (slump test) .....	44
6.1.1. Procedimento de ensaio .....	44
6.2. Ensaio de determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons.....	45
6.2.1. Equipamento de ensaio .....	46
6.2.2. Procedimentos de ensaio.....	46
6.2.3. Determinação do Módulo de elasticidade.....	48
6.3. Ensaio de resistência à compressão.....	49
6.3.1. Procedimento de ensaio .....	49
6.3.2. Modo de Rotura dos provetes.....	50
6.4. Ensaio de carbonatação .....	52
6.4.1. Procedimento de ensaio .....	52
6.4.2. Fenolftaleína como indicador do nível de carbonatação.....	53
6.5. Ensaio de resistência à penetração por cloretos .....	53
6.5.1. Preparação para ensaio .....	53
6.5.2. Procedimento de ensaio .....	54
7. Caracterização do comportamento do betão de cal hidráulica aditivado de metacaulino .....	58
7.1. Trabalhabilidade do betão .....	59
7.2. Módulo de elasticidade do betão.....	59
7.3. Resistência à compressão.....	62

---

7.3.1. Análise visual dos provetes sujeitos ao ensaio de compressão .....	62
7.3.2. Análise dos resultados do ensaio de resistência de compressão .....	63
7.4. Carbonatação do betão .....	67
7.5. Resistência à penetração de cloretos .....	68
7.6. Discussão dos resultados obtidos .....	72
8. Conclusões e perspectivas futuras .....	75
8.1. Principais conclusões .....	76
8.2. Perspectivas futuras .....	77
9. Bibliografia .....	79

## Índice de tabelas

### Capítulo 3

Tabela 3.1. Resistência de compressão para as diferentes misturas aos 7, 28 e 90 dias (Velosa et al., 2009).....	19
Tabela 3.2. Resistência à compressão para as diferentes misturas aos 7, 28, 90 e 360 dias (Cachim et al., 2010).....	22
Tabela 3.3. Trabalhabilidade e tempos de presa do betão aditivado com metacaulino (Brooks et al., 2001).....	23
Tabela 3.4. Módulo de elasticidade com diferentes quantidades de metacaulino (Gian et al., 2001) .....	24
Tabela 3.5. Resistência de compressão do betão de controlo e das misturas (Poon et al., 2006).....	25
Tabela 3.6. Permeabilidade dos cloretos em betões de controlo e misturas (Poon et al., 2006).....	26

### Capítulo 5

Tabela 5.1. Propriedades químicas do metacaulino.....	38
Tabela 5.2. Quadro com as composições realizadas de acordo com a percentagem de cal hidráulica .....	39

### Apêndice I

Tabela I.1. Granulometria dos agregados utilizados na produção do betão.....	i
Tabela I.2. Parâmetros para definição da curva de referência e da curva da mistura .....	ii
Tabela I.3. Massas volúmicas dos agregados utilizados na produção do betão .....	ii
Tabela I.4. Dosagem considerada para o cálculo da composição da mistura com 0% de metacaulino .....	ii
Tabela I.5. Volume de agregados por m <sup>3</sup> de mistura com 0% de metacaulino.....	ii
Tabela I.6. Massa dos componentes do betão por m <sup>3</sup> de mistura com 0% de metacaulino .....	ii
Tabela I.7. Massa de componentes de betão para produzir 35 kg de betão da mistura com 0% de metacaulino (quantidade de betão necessária para produzir 10 provetes) .....	iii
Tabela I.8. Volume de plastificante utilizado na mistura com 0% de metacaulino, utilizando uma razão de 0,6% de plastificante.....	iii
Tabela I.9. Massa de componentes necessária para a produção de 35Kg de betão da mistura com 10% de metacaulino .....	iii
Tabela I.10. Volume de plastificante utilizado nas misturas com 10% e 20 % de metacaulino, utilizando uma razão de 1,0% de plastificante.....	iii

Tabela I.11. Massa de componentes necessária para a produção de 35Kg de betão da mistura com 20% de metacaulino .....	iv
---	----

## Apêndice II

Tabela II.1. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M0 aos 28 dias de cura .....	v
---	---

Tabela II.2. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M0 aos 90 dias de cura .....	v
---	---

Tabela II.3. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M0 aos 180 dias de cura .....	vi
--	----

Tabela II.4. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M1 aos 28 dias de cura .....	vi
---	----

Tabela II.5. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M1 aos 90 dias de cura .....	vii
---	-----

Tabela II.6. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M1 aos 180 dias de cura .....	vii
--	-----

Tabela II.7. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M2 aos 28 dias de cura .....	viii
---	------

Tabela II.8. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M2 aos 90 dias de cura .....	viii
---	------

Tabela II.9. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M2 aos 180 dias de cura .....	ix
--	----

## Apêndice III

Tabela III.1. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M0 aos 28 dias .....	xiii
--	------

Tabela III.2. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M0 aos 90 dias .....	xiii
--	------

Tabela III.3. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M0 aos 180 dias .....	xiii
---	------

Tabela III.4. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M1 aos 28 dias .....	xiii
Tabela III.5. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M1 aos 90 dias .....	xiv
Tabela III.6. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M1 aos 180 dias.....	xiv
Tabela III.7. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M2 aos 28 dias .....	xv
Tabela III.8. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M2 aos 90 dias .....	xv
Tabela III.9. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M2 aos 180 dias .....	xv

#### **Apêndice IV**

Tabela IV.1. Volume da amostra sujeita ao ensaio de adição padrão e concentração da solução da adição padrão .....	xviii
Tabela IV.2. Resultados obtidos para as concentrações de íões cloreto para as diferentes composições e em diferentes profundidades, para os provetes com 28 dias de cura em câmara húmida .....	xviii
Tabela IV.2. Resultados obtidos para as concentrações de íões cloreto para as diferentes composições e em diferentes profundidades, para os provetes com 28 dias de cura em câmara húmida .....	xviii

## Índice de figuras

### Capítulo 3

Figura 3.1. Comparação entre força de compressão e tensão de tracção e a respectiva curva do EC2 (Velosa et al., 2009).....	19
Figura 3.2. Relação do índice pozolânico nos betões de cal onde esta é substituída por 20% e 30% por resíduos de argila nas diferentes condições de cura (Velosa et al., 2009).....	20
Figura 3.3. Profundidade de carbonatação média após ensaio acelerado em provetes dos diferentes tipos de betão (Sampaio et al., 2001) .....	26

### Capítulo 5

Figura 5.1. Agregados utilizados neste trabalho. Da esquerda para a direita: Brita grossa (brita 12/25), Brita fina (Brita 8/12) e areia.....	35
Figura 5.2. Representação das curvas granulométricas dos três tipos de agregados utilizados na produção do betão.....	36
Figura 5.3. Cal hidráulica (NHL5) utilizada neste trabalho.....	37
Figura 5.4. Metacaulino, Argical M-1000 .....	38
Figura 5.5. Betoneira utilizada na amassadura do betão.....	40
Figura 5.6. Moldes utilizados na produção dos provetes de 100x100x100 [mm <sup>3</sup> ] .....	41
Figura 5.7. Armazenagem dos provete em câmara humida .....	42

### Capítulo 6

Figura 6.1. Ensaio de abaixamento realizado neste trabalho .....	45
Figura 6.2. Esquema de aparelho de medida da velocidade de propagação de ultra-sons .....	46
Figura 6.3. Aferição do aparelho utilizado na medição da velocidade de propagação dos ultra-sons (PUNDIT).....	47
Figura 6.4. Tipos de leitura da velocidade de propagação dos ultra-sons.....	47
Figura 6.5. Prensa utilizada no ensaio de compressão dos provetes.....	50
Figura 6.6. Esquema do de rotura atingido quando o atrito do prato da prensa impede a deformação transversal da secção de aplicação das forças de compressão .....	51
Figura 6.7. Modos rotura satisfatórios para provetes cúbicos de acordo com a norma portuguesa NP EN 12390-3.....	52

Figura 6.8. Modos rotura não satisfatórios para provetes cúbicos de acordo com a norma portuguesa NP EN 12390-3.....	52
Figura 6.9. Provede sujeito a ensaio de carbonatação posteriormente a ser fracturado pelo ensaio de compressão.....	53
Figura 6.10. Isolamento dos provetes com Poxitar F, para posterior ensaio á penetração de cloretos.....	54
Figura 6.11. Processo de diluição.....	55

## Capítulo 7

Figura 7.1. Resultados do módulo de elasticidade médios das composições M0, M1 e M2 nas idades em estudo (28, 90, 180 dias).....	60
Figura 7.2. Evolução do módulo de elasticidade das diferentes composições com a idade do betão.....	61
Figura 7.3. Modo de rotura evidenciado pelos provetes cúbicos durante o ensaio de compressão .....	62
Figura 7.4. Modo de rotura evidenciado pelos provetes cúbicos após ensaio de compressão .....	62
Figura 7.5. Resultados de resistência à compressão simples média das composições M0, M1 e M2 nas idades de 28, 90 e 180 dias.....	63
Figura 7.6. Evolução da resistência à compressão das diferentes composições ao longo do tempo.....	64
Figura 7.7. Relação entre a resistência de compressão e a massa dos provetes das diferentes composições aos 28 dias de idade.....	65
Figura 7.8. Relação entre a resistência de compressão e a massa dos provetes das diferentes composições aos 90 dias de idade.....	65
Figura 7.9. Relação entre a resistência de compressão e a massa dos provetes das diferentes composições aos 180 dias de idade.....	66
Figura 7.10. Provede de composição M0 aos 180 dias de idade sujeito ao ensaio de fenolftaleína após ensaio de compressão.....	67
Figura 7.11. Provede de composição M1 aos 180 dias de idade sujeito ao ensaio de fenolftaleína após ensaio de compressão.....	67
Figura 7.12. Provede de composição M2 aos 180 dias de idade sujeito ao ensaio de fenolftaleína após ensaio de compressão.....	68
Figura 7.13. Penetração de iões cloreto em profundidade para as diferentes misturas evidenciadas pelos provetes com 28 dias de cura em câmara húmida. ....	69
Figura 7.14. Penetração de iões cloreto em profundidade para as diferentes misturas evidenciadas pelos provetes com 28 dias de cura em câmara húmida. ....	69
Figura 7.15. Gráfico de comparação dos valores de concentração em iões cloreto existentes nas camadas analisadas para as distintas misturas, nos provetes com 28 dias de cura .....	71

Figura 7.16. Gráfico de comparação dos valores de concentração em íões cloreto existentes nas camadas analisadas para as distintas misturas, nos provetes com 180 dias de cura ..... 71

## Apêndice I

Figura II.1. Gráfico de barras referente à evolução do módulo de elasticidade dos provetes da composição M0 nas três idades em estudo..... **Erro! Marcador não definido.**

Figura II.2. Gráfico de barras referente à evolução do módulo de elasticidade dos provetes da composição M1 nas três idades em estudo..... x

Figura II.3. Gráfico de barras referente à evolução do módulo de elasticidade dos provetes da composição M2 nas três idades em estudo..... x

## Apêndice III

Figura III.1. Gráfico de barras referente à evolução da resistência à compressão dos provetes da composição M0 com o tempo de cura ..... xvi

Figura III.2. Gráfico de barras referente à evolução da resistência à compressão dos provetes da composição M0 com o tempo de cura ..... xvi

Figura III.3. Gráfico de barras referente à evolução da resistência à compressão dos provetes da composição M0 com o tempo de cura ..... xvii



# 1. Introdução

Neste capítulo procede-se à apresentação do trabalho, focando-se o enquadramento e justificação do tema e considerações gerais sobre o mesmo. Descrevem-se também neste capítulo os objectivos do trabalho, a metodologia de investigação adoptada e por último a estrutura da presente dissertação.

---

## 1.1. Considerações gerais

Na actualidade o betão é amplamente utilizado na construção, desempenhando um papel fundamental para a construção em Portugal, torna-se então imprescindível o conhecimento do seu comportamento de forma a serem satisfeitas as condições exigidas em projecto ao nível de segurança, funcionalidade e estética. Nesta dissertação será analisado o comportamento do betão de cal hidráulica aditivado com metacaulino português.

Todas as matérias-primas utilizadas no fabrico do betão têm influência no seu comportamento quer enquanto fresco quer posteriormente quando endurecido. O betão produzido com cimento Portland, desempenhando este o papel de material ligante, é o tipo de betão mais comumente utilizado na construção. Este tipo de betão apresenta um excelente desempenho ao nível da resistência à compressão, sendo por isso indicado para obras em que as exigências estruturais sejam elevadas (Coutinho, 1997 e Velosa et al., 2009).

A indústria de cimento é responsável por cerca de 5% das emissões globais de dióxido de carbono. Indo de encontro às exigências do Protocolo de Quioto o sector da construção deve

reduzir as suas emissões de gases de efeito estufa, assim a substituição do cimento Portland por outros materiais ligantes, como a cal hidráulica, deve ser tida em consideração sempre que esta substituição garanta o desempenho satisfatório das exigências estruturais (Velosa et al., 2009).

A adição de metacaulino ao betão de cal hidráulica permite a obtenção de um betão mais viável relativamente à sua empregabilidade em obra, uma vez que este material pozolânico confere ao betão um aumento da resistência à compressão simples (Cachim et al., 2010)

## 1.2. Enquadramento e justificação do tema

Nos últimos anos tem-se vindo a desenvolver uma maior consciencialização para a degradação da situação ambiental e suas consequências como o aquecimento global e as alterações climáticas, com repercussões extremas para o planeta. Com o intuito de amenizar as consequências nefastas para o ambiente provocadas pelo sector da construção, indo de encontro aos objectivos estabelecidos pelo Protocolo de Quioto de redução da emissão de gases capazes de produzir efeito estufa, devem realizar-se algumas mudanças neste sector como a utilização de combustíveis alternativos e mudança de componentes do betão com o objectivo de reduzir a emissão de gases capazes de produzir o efeito estufa (Velosa et al., 2009).

A indústria de cimento é responsável por cerca de 5% das emissões globais de dióxido carbono, sendo aproximadamente 50% deste, originado através da decomposição do carbonato e 40% produzido pela queima de combustíveis no forno. Quanto à relação entre a produção de cimento e a emissão de CO<sub>2</sub>, existem estimativas de que para a produção de uma tonelada de cimento seja emitida cerca de uma tonelada de CO<sub>2</sub> (Velosa et al., 2009).

A utilização de subprodutos industriais tais como cinzas volantes ou escórias de alto-forno como substituição parcial do cimento Portland na produção do betão, tem como resultado um menor consumo de energia bem como permite utilizar materiais que de outra forma acabariam por poluir a terra, o mar e a atmosfera. A presença de aditivos no betão permite obter um betão com melhor trabalhabilidade e durabilidade (Sampaio et al., 2001).

O cimento Portland é muito utilizado na produção de betão por várias razões, tais como o bom desempenho, a boa resistência e por ser um produto já muito estudado. Como o betão de cimento Portland pode ser utilizado com um betão de alto desempenho relativamente à

resistência, este é o betão indicado para grandes obras, já para obras menores, onde as exigências estruturais são menores o cimento pode ser substituído por outros materiais ligantes como a cal hidráulica, que produzem um betão menos resistente mas com a resistência necessária para essas obras. A cal hidráulica apresenta como vantagem relativamente ao cimento Portland o ser menos poluente. O CO<sub>2</sub> emitido pela produção de cal hidráulica é aproximadamente 82% menor que o emitido na produção cimento Portland (Velosa et al., 2007, Velosa et al., 2009).

Ao longo dos tempos, principalmente antes da descoberta do cimento Portland, tanto a cal aérea com aditivos pozolânicos como a cal hidráulica foram utilizados como ligantes na construção, tendo desempenhado as suas funções satisfatoriamente e apresentando uma grande durabilidade (Coutinho., 1997).

A cal hidráulica, após a descoberta do cimento Portland, tem sido pouco utilizada, sendo a sua aplicação destinada maioritariamente á conservação de edifícios. No entanto, trata-se de uma alternativa viável ao cimento na produção de betão, onde seja necessária uma moderada resistência mecânica, podendo o seu desempenho ser melhorado através da adição de materiais pozolânicos, como é o caso do metacaulino (Coutinho,1997, Cachim et al., 2010).

Com as novas exigências ambientais justifica-se o estudo de comportamento do betão de cal hidráulica aditivado de metacaulino português, pois a utilização de cal hidráulica como ligante resulta numa diminuição da emissão de gases de efeito estufa e apresenta um comportamento satisfatório em obras com menores exigências relativamente a resistência mecânica (Cachim et al., 2010).

### **1.3. Objectivos e metodologia de investigação**

Este trabalho tem como principal objectivo a avaliação do comportamento do betão de cal hidráulica aditivado com metacaulino Português. As características avaliadas neste trabalho serão a resistência á compressão, o módulo de elasticidade, o nível de carbonatação e a resistência à penetração por cloretos do betão em provetes de 100x100x100 [mm<sup>3</sup>].

Para a realização deste estudo o betão utilizado terá como ligante cal hidráulica (NHL5) e como aditivo pozolânico metacaulino produzido em Portugal. Serão realizadas diferentes composições de betão nas quais apenas se variará a quantidade de cal hidráulica sendo parte desta substituída por metacaulino, ou seja as diferentes composições terão iguais quantidades

quer de agregados quer de água. Foi ajustada a quantidade de superplastificante de forma a obter trabalhabilidade semelhante nas diferentes composições.

De forma a avaliar a evolução do comportamento do betão ao longo do tempo serão ensaiadas as diferentes composições em diferentes idades, nomeadamente, aos 28, 90 e 180 dias.

Os objectivos deste trabalho são os seguintes:

- I. Proceder ao ensaio de Abrams, de forma a conhecer a trabalhabilidade atingida nas diferentes composições em estudo;
- II. proceder-se a ensaios de medição da velocidade de propagação de ultra-sons, utilizando o pundit, com o objectivo de analisar o módulo de elasticidade das diferentes composições e sua evolução durante o tempo de cura;
- III. realizar ensaios de compressão nos vários conjuntos de provetes de forma a avaliar a capacidade resistente das diferentes composições de betão e a sua evolução com o tempo, avaliando consequentemente a sua viabilidade;
- IV. efectuar o ensaio de fenolftaleína, de forma a analisar o nível de carbonatação dos provetes durante o tempo de cura;
- V. estudar a resistência á penetração de cloretos nas diferentes composições após submersão durante 28 dias em água do mar sintética;

## **1.4. Estrutura da dissertação**

A presente dissertação é constituída por 8 capítulos. O presente capítulo constitui a introdução do trabalho realizado, no qual se inserem algumas considerações gerais bem como se procede ao enquadramento e justificação do tema. Descrevem-se ainda neste capítulo os objectivos e a metodologia de investigação adoptada neste trabalho.

No segundo capítulo são referidas algumas considerações sobre as matérias-primas e a sua influência no comportamento do betão, apresentando-se uma revisão bibliográfica sobre o assunto.

No capítulo 3 são detalhados dois estudos existentes relativos ao comportamento do betão de cal hidráulica com adição de materiais pozolânicos. Neste capítulo são ainda referidas as principais conclusões encontradas na literatura sobre o comportamento do betão de cimento Portland aditivado com metacaulino.

No quarto capítulo são apresentadas algumas noções sobre o conceito de durabilidade de betão, sendo ainda apresentados os principais fenómenos que provocam corrosão das armaduras de betão armado, uma das formas de deterioração das estruturas de betão armado mais grave.

O capítulo 5 é dedicado à sistematização e justificação dos materiais utilizados neste trabalho. Neste capítulo procede-se à descrição da composição e da metodologia de produção do betão referindo-se também a forma de acondicionamento dos provetes durante o tempo de cura.

O capítulo 6 diz respeito à justificação e sistematização de todos os ensaios realizados neste trabalho. Neste capítulo são ainda descritos os modos de rotura dos provetes possíveis de verificar no ensaio de resistência de compressão e quais destes são satisfatórios de acordo com o normalizado.

No capítulo 7 procede-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos nos diferentes ensaios executados, ou seja, apresentam-se os resultados relativos à trabalhabilidade, módulo de elasticidade, resistência de compressão, nível de carbonatação e resistência à penetração por cloretos dos provetes realizando-se uma análise dos mesmos.

Finalmente, no capítulo 8, são apresentadas as principais conclusões do trabalho efectuado e indicam-se algumas perspectivas de desenvolvimento de trabalhos futuros.



## **2. Considerações acerca das matérias-primas e o seu contributo no comportamento do betão**

No presente capítulo procede-se a uma revisão bibliográfica sobre as matérias-primas utilizadas na produção do betão e o seu contributo no comportamento do betão quer enquanto fresco quer quando endurecido

---

“O betão é um material constituído pela mistura, devidamente proporcionada, de pedras e areia, com um ligante hidráulico, água e, eventualmente, adjuvantes. A propriedade que os produtos da reacção dos ligantes com a água têm de endurecer, confere à mistura uma coesão e resistência que lhe permite servir como material de construção.”

Coutinho, 1997

## 2.1. Agregados

Os agregados são constituídos por partículas provenientes, de rochas, de depósitos arenosos ou ainda, por partículas artificiais especificamente fabricadas para o emprego em betão ou obtidas por reciclagem de determinados materiais. As suas dimensões variam geralmente entre cerca de 0,1 mm e 20 cm e são dispersas pela pasta de cimento para formar o betão, sendo necessário ter em conta que as características do agregado afectam profundamente o comportamento do betão (Coutinho, 2002).

O agregado até há não muito tempo atrás era designado por “inerte”, mas as suas partículas não são inactivas, uma vez que as suas propriedades físicas, térmicas e por vezes químicas afectam o desempenho do betão. Quando sujeitas a determinadas condições as partículas de agregado podem reagir com o cimento, como é o caso do sulfato de ferro ou da sílica activa que podem provocar expansão e oxidação. (Neville, 1995 e Coutinho, 1997).

Os agregados afectam todas as propriedades do betão, e especialmente a sua resistência através da composição granulométrica, da tensão de rotura do próprio agregado e da resistência da ligação entre a pasta de cimento e a sua superfície (Coutinho, 1997).

Quanto à sua origem podemos classificar os agregados como naturais, como é o caso de areias e gados, ou britados sendo estes originados por meio de britagem dos materiais naturais, como é o caso de britas e areias britadas. São ainda utilizados agregados artificiais que têm origem industrial e são produzidos com o intuito de obter um betão com determinadas qualidades, como é o caso da argila ou xisto expandidos (Coutinho, 2002).

No processo de escolha dos agregados devem ser exigidas certas propriedades químicas, físicas e geométricas de forma a se obter um melhor controlo do comportamento do betão. As propriedades mais importantes que devem ser exigidas aos agregados para a produção de betão são (Coutinho, 2002):

1. formas e dimensões apropriadas, seguindo regras estabelecidas;
2. apropriada resistência;
3. apropriadas propriedades térmicas;
4. adequadas propriedades químicas quer em relação ao ligante quer às acções exteriores;
5. não conter substâncias prejudiciais.

As propriedades de agregado com maior repercussão no comportamento do betão são: a granulometria, a forma das partículas, a porosidade, absorção, elasticidade, resistência mecânica e características que as partículas podem possuir capazes de afectar a aderência da pasta do cimento endurecida (Coutinho, 2002).

As propriedades dos agregados têm grande influência na trabalhabilidade do betão obtido. Esta influência manifesta-se essencialmente sobre dois aspectos, sendo estes: a quantidade de água lubrificante necessária para atingir determinada trabalhabilidade, condicionada principalmente pela capacidade de absorção e pelas características das partículas de agregado, e a alteração das propriedades reológicas do betão, influenciada pela granulometria e pelas formas do agregado (Coutinho, 2002).

Para avaliar apropriadamente a qualidade de um agregado é essencial que não só sejam realizados ensaios indicativos da qualidade do próprio agregado como também se realizem estudos relativos ao comportamento do betão produzido com esse agregado (Coutinho, 2002).

Justifica-se proceder a ensaios apenas ao agregado, uma vez que um agregado considerado inadequado relativamente a mais que uma propriedade muito dificilmente constituirá um betão de qualidade satisfatória (Neville, 1995).

## **2.2. Cal hidráulica como material ligante**

De acordo com Coutinho (1997) “A designação de ligantes deve-se à propriedade que têm de poder aglomerar uma proporção elevada de materiais inertes, como areias, godos, pedra britada, etc., conferindo ao conjunto grande coesão e resistência, o que os torna aptos a serem utilizados na construção como argamassas e betões.”

Os ligantes podem ser classificados consoante a sua relação com a água em ligantes hidrófilos ou ligantes hidrófobos. Os ligantes hidrófilos têm afinidade com a água, este tipo de ligante quando misturado com a água forma uma pasta que endurece aglomerando os outros materiais, daí este tipo de ligante ter aplicabilidade na produção de betão e argamassas, são exemplos deste tipo de ligante: o gesso, a cal aérea, a cal hidráulica, etc. Já nos ligantes hidrófobos a água não é necessária no processo de endurecimento, este geralmente resulta do processo de arrefecimento e após endurecimento do aglomerante estes ligantes têm a capacidade de repelir a água, sendo este tipo de ligante utilizado essencialmente em impermeabilizações e pavimentos (Coutinho, 2002).

Relativamente aos ligantes hidrófilos estes podem ser ainda classificados como aéreos ou hidráulicos consoante a sua resistência á água. A cal aérea e o gesso são exemplos de ligantes do género hidrófilo aéreo uma vez que misturados com a água formam uma pasta que posteriormente endurece ao ar, após endurecida esta pasta não resiste à água. Por sua vez os ligantes do género hidrófilo hidráulico quando misturados com a água formam uma pasta que tanto endurece ao ar como dentro de água, esta pasta resiste posteriormente à água. A cal hidráulica e o cimento são classificados como ligantes do género hidrófilo hidráulico (Coutinho, 2002).

A função da cal enquanto material ligante, surge antes da utilização quer de ligantes hidráulicos quer do cimento Portland. Sendo a cal originada pela cozedura da rocha calcária, o facto do calcário ser uma rocha bastante comum permitiu uma vasta utilização da cal como ligante quando ainda não eram conhecidos outros materiais ligantes, agora comuns, como o cimento Portland e os ligantes hidráulicos (Coutinho, 1997).

Relativamente aos diferentes tipos de cal existentes estes variam entre si de acordo com a quantidade de argila presente no calcário. Esta presença de argila na amostra é originada pela presença de partículas de argila em suspensão quando ocorre a precipitação do carbonato de cálcio, pois o processo de precipitação leva a que as partículas em suspensão sejam arrastadas com o calcário, este fenómeno é frequente quando a precipitação ocorre em águas com pouco movimento. De acordo com a quantidade de argila existente na rocha calcária atribuem-se diferentes classificações ao calcário. Podemos então diferenciar os calcários puros, que não possuem argila, dos calcários margosos que por sua vez apresentam argila na sua constituição, quando as quantidades de argila são superiores às de carbonato denominam-se como margas calcárias (Coutinho, 1997).

Através da cozedura de calcários com diferentes concentrações de argila são originados os diferentes tipos de cal. Como produto da cozedura do calcário puro é obtido hidróxido de cálcio, o qual constitui a cal aérea. As cals hidráulicas são originadas pela cozedura de calcário margoso, sendo consideradas de maior ou menor grau hidráulico consoante o teor de argila presente no calcário. Por sua vez, a cozedura de margas calcárias origina os cimentos naturais (Coutinho, 1997).

O calcário margoso utilizado na produção de cal hidráulica tem na sua constituição carbonato de cálcio e uma percentagem de argila que varia entre os 5% e os 20%. Os calcários utilizados para a produção de cal hidráulica possuem sílica e alumina, em percentagens não desprezáveis, visto estes serem constituintes importantes das argilas. Da combinação da sílica e da alumina com o óxido de cálcio são originados silicatos e aluminatos que por sua vez ao

serem hidratados dão origem a um produto que quer endurece em contacto com o ar quer em contacto com a água. Assim surge a distinção entre cais aéreas, que apenas endurecem em contacto com o ar e as cais hidráulicas que o processo de endurecimento tanto pode ocorrer em contacto com o ar como com a água (Coutinho, 1997).

Segundo Vicat, a hidráulidade da cal depende do teor de argila presente no calcário, tendo estabelecido o limite do teor de argila em 20%, a partir do qual a cal já não se extingue em contacto com a água, marcando este limite a transição entre cais hidráulicas e os cimentos naturais, que são originados por calcários com teor em argila entre os 20% e os 40%.

O processo de produção de cal hidráulica é semelhante ao da cal aérea, sendo o calcário levado ao forno sofrendo várias mudanças consoante as temperaturas desenvolvidas. Até serem atingidas temperaturas entre os 105°C e os 110°C ocorre a evaporação da água de embebição da pedra perdendo o calcário entre os 5% e os 10% de massa durante esta fase, posteriormente efectua-se a desidratação da marga até se desenvolverem temperaturas de 500°C ou 700°C. Quando a temperatura atinge valores entre os 850°C e os 900°C dá-se a decomposição do calcário. Na última fase do processo de aquecimento ocorre a combinação da sílica e da alumina com parte da cal, estas combinações ocorrem a temperaturas entre os 1200°C e os 1500°C, nesta fase são produzidos silicatos e aluminatos, tal como no processo de produção de cimento Portland, no entanto estes são menos ricos em cal (Coutinho, 1997).

Velosa (2006) refere que “No fabrico da cal hidráulica, com cozedura das matérias-primas a cerca de 1200°C, geram-se compostos semelhantes aos presentes no fabrico de cimento, sendo de salientar a formação de  $C_2S$  ( $2CaO.SiO_2$ ) e os compostos  $C_3A$  ( $3CaO.Al_2O_3$ ) e  $C_4AF$  (na forma de solução sólida variando entre  $C_2F$  ( $2CaO.Fe_2O_3$ ) e  $C_6A_2F$  ( $6CaO.2Al_2O_3.Fe_2O_3$ )), embora estes últimos estejam presentes em pequenas quantidades. É expectável a presença escassa de  $C_3S$  ( $3CaO.SiO_2$ ) devido a altas temperaturas pontuais no processo de queima, assim como de percentagens variáveis de calcite, dolomite e CaO que não tiveram tempo, temperatura ou estequiometria para reagirem. A principal diferença de composição relativamente ao cimento reside na diminuição da relação  $C_3S/C_2S$ , dado que o primeiro composto é formado a temperaturas mais elevadas, só pontualmente atingidas nos fornos de fabricação de cal hidráulica. Ao nível de fabrico, este produto necessita de passar pelo processo de extinção, da mesma forma que a cal aérea de forma a converter o CaO em  $Ca(OH)_2$ .”

No final do processo de aquecimento é obtido pó e partículas de diversas dimensões. Este material após ser retirado do forno deve ser extinto, de forma a eliminar a cal viva e

pulverizar a cal hidráulica, daqui se distingue a produção de cal hidráulica da produção do cimento Portland, pois na cal a finura é obtida por extinção da cal viva enquanto no cimento é por moagem. De notar que a água utilizada durante o processo de extinção deve apenas ser a estritamente necessária para hidratar a cal viva, pois a água em excesso pode desencadear a hidratação dos silicatos e dos aluminatos e não apenas a sua pulverização como quando feito com a quantidade de água indicada (Coutinho, 1997).

Para a utilização de cal na construção é necessário que a totalidade da cal hidráulica esteja extinta, bem como é essencial se proceder á separação de incozidos e sobrecozidos. Assim, após a extinção procede-se á separação entre grãos e pó, os grãos por sua vez podem ser posteriormente moídos e adicionados á cal resultando daí uma maior hidraulicidade da cal, visto os sobrecozidos constituírem clínqueres. Para além da adição dos sobrecozidos pode obter-se um aumento de hidraulicidade adicionando pozolanas ou escórias de alto-forno, permitindo ao produtor atender aos padrões de força, mesmo com a variabilidade que existe na matéria-prima (Coutinho, 1997).

As especificações exigidas às cal hidráulicas, são geralmente relativas á finura, expansibilidade, tempo de presa, tensões de rotura, limites das características químicas de perda ao rubro, teores de óxido de cálcio, ferro, alumínio, sílica e magnésio e ainda ao resíduo insolúvel (Coutinho, 1997).

### **2.3. Metacaulino**

As pozolanas são materiais essencialmente constituídos por sílica e alumina, estes materiais não possuem por si só propriedades aglomerantes ou hidráulicas, no entanto, os seus constituintes na presença de água e a temperaturas ordinárias combinam-se com hidróxido de cálcio e com componentes do cimento, formando-se compostos com grande estabilidade na água e com propriedades aglomerantes. Estes produtos possuem grande reactividade com o hidróxido de cálcio mas são insolúveis na água, não reagindo com esta (Coutinho, 1997).

Quanto á sua origem as pozolanas podem ser divididas em dois grupos: naturais e artificiais. As pozolanas naturais são provenientes de rochas lávicas alteradas por meteorização, estas pozolanas encontram-se em zonas onde já ocorreram ou ainda ocorrem fenómenos vulcânicos. Já as pozolanas artificiais são originadas pelo tratamento térmico de materiais de base siliciosa, através da cozedura dá-se a formação de sílica amorfa. As temperaturas a que estes materiais são sujeitos não devem ser demasiado elevadas de forma a não ser

potencializada a nucleação e a cristalização. Após a sujeição ao tratamento térmico estes materiais são submetidos a um arrefecimento brusco, promovendo a formação de matéria amorfa ou de baixo grau de cristalinidade que resulta numa maior reactividade (Coutinho, 1997 e Velosa, 2006).

As pozolanas são divididas em três classes distintas de acordo com a norma ASTM C 618-01, sendo estas, Classe N, Classe F e Classe C. Na classe N estão englobadas as pozolanas naturais, como terras diatomáceas, opala, tufos, cinzas vulcânicas entre outras. Quanto às classes F e C ambas dizem respeito a cinzas volantes, distinguindo-se a classe F pela inclusão de cinzas produzidas a partir de antracite queimada ou carvão e a Classe C por incluir as cinzas produzidas por lignite ou carvão sub-betuminoso (Velosa, 2006).

O metacaulino é produzido através da calcinação do caulino, por meio de cozedura do material caulínico a temperaturas adequadas, podendo o caulino apresentar diferentes níveis de pureza (Velosa, 2006).

Calcinando o caulino a temperaturas entre os 500 e 900°C ocorre a desidroxilação (perda de hidroxilos) acompanhada da alteração do arranjo do alumínio. Através desta transformação do caulino em metacaulino tem como resultado um material muito mais reactivo, atribuindo-lhe propriedades pozolânicas (Coutinho, 1997).

Na literatura existente sobre a pozolana metacaulino encontramos diferenças no intervalo de temperatura a que ocorre o processo de calcinação, divergindo este intervalo de acordo com os diferentes autores. Segundo Sabir et al. (2001) a temperatura ideal para ocorrer a calcinação é entre os 600°C e os 900°C, no entanto os autores Souza et al. (2005) e Siddique et al. (2009) referem que este intervalo se encontra entre os 500°C e os 900°C.

O tamanho da partícula inicial do caulino não condiciona a transformação da caulinite nem o comportamento do material produzido. A moagem é benéfica, pois ao reduzir o tamanho da partícula de metacaulino a sua superfície específica é aumentada levando a uma maior reactividade (Kaloumenou et al. 1999).

As características do metacaulino dependem da composição do caulino que lhe dá origem. Assim, o metacaulino pode apresentar diferentes graus de finura, diferentes superfícies e diferentes cores (branca, creme ou rosada), consoante a composição química e mineralógica do caulino de base (Coutinho, 1997).

Na produção de betão com cimento Portland, a utilização de metacaulino como aditivo já é bastante conhecida, tanto relativamente á resistência mecânica do betão como á sua

durabilidade. Também os produtos das reacções entre cimento e betão ou metacaulino e argamassa foram já objecto de estudo, tendo-se demonstrado que destas reacções resulta a formação de outros compostos para além do Silicato de Cálcio Hidratado (CSH), sendo estes aluminato de cálcio hidratado e alumino-silicatos de cálcio hidratados (Cachim et al., 2010).

Relativamente á adição de metacaulino em betões produzidos com cal hidráulica os estudos já existentes revelam que entre o metacaulino e a cal hidráulica as reacções de carbonatação têm um carácter mais relevante, sendo as reacções hidráulicas mais lentas quando comparadas com as que ocorrem na adição do metacaulino ao cimento Portland (Cachim et al., 2010).

## **2.4. Água de amassadura**

Relativamente à água de amassadura para além do cuidado de utilizar a quantidade adequada de acordo com a mistura de betão a obter, deve-se ter presente que a água a utilizar na produção de betão deve ser potável, ou não sendo potável, esta não deve possuir cheiro ou sabor (Coutinho, 1997).

O comportamento do betão é influenciado pela água de amassadura pois esta possui substâncias dissolvidas e em suspensão capazes de afectar as suas propriedades. O tipo de propriedades do betão afectadas depende da forma como as partículas se encontram na água, no caso das partículas dissolvidas estas podem afectar quer a sua resistência química quer mecânica enquanto que as partículas em suspensão afectam geralmente o crescimento cristalino dos produtos de hidratação do betão e a compacidade (Coutinho, 1997).

## **2.5. Superplastificantes**

Os plastificantes são assim designados devido ao facto das primeiras adições feitas aos betões e argamassas terem sido produtos pulverulentos e de grande finura, como é o caso da diatomite, da cal gorda, da betonite e de pozolanas enérgicas e muito finas. Estes materiais eram adicionados ao betão em quantidades muito reduzidas, aproximadamente 2% ou 3% da massa de cimento, estes permitiam a redução da água de amassadura mantendo a trabalhabilidade ambicionada ou aumentar a trabalhabilidade mantendo a quantidade de água. A

composição química do cimento influencia a eficiência dos plastificantes, especialmente o teor de aluminato tricálcico (Coutinho, 1997).

São inúmeras as finalidades pelas quais se utilizam plastificantes no betão, tais como (Coutinho, 1997):

1. Redução da dosagem de cimento, sem prejudicar nem a trabalhabilidade nem a tensão de rotura;
2. Aumento da tensão de rotura;
3. Aumento da trabalhabilidade, mantendo quer a quantidade de água quer de cimento;
4. Diminuição da permeabilidade do betão.

Os adjuvantes redutores de água são classificados indo de encontro á sua finalidade, ou seja, os plastificantes são assim denominados porque plastificam o betão e reduzem a quantidade de água (Coutinho, 1997).

Azevedo (2002) refere que “Os superplastificantes são adjuvantes para betão, definidos na especificação do LNEC E374-1993, como materiais adicionados durante a amassadura em quantidade que não exceda os 5% da massa do cimento, com o objectivo de modificar as propriedades do betão no estado fresco ou endurecido. Segundo a mesma especificação, um superplastificante (ou adjuvante redutor de água de alta gama) é definido como um material que, sem afectar a trabalhabilidade, permite uma alta redução da dosagem de água de uma dada mistura, ou que, sem modificar a dosagem de água, aumenta consideravelmente a trabalhabilidade, ou que produz os dois efeitos simultaneamente. As características a exigir aos superplastificantes referem-se à sua identificação, compatibilidade com os cimentos e comportamento no betão.”

Os superplastificantes são classificados de acordo com o seu composto químico base, dividindo-se em quatro categorias distintas: linhossulfatos modificados, condensados de melamina formaldeído sulfonato, condensados de naftaleno formaldeído sulfonato e copolímeros. Os superplastificantes mais utilizados têm como composto base os condensados de melamina ou os condensados de naftaleno. Deve sempre assegurar-se a compatibilidade entre o cimento e o superplastificante utilizado, esta é uma propriedade fundamental a ter em conta na escolha do superplastificante (Azevedo, 2002).



### **3. Influência da adição de material pozolânico no comportamento do betão de cal hidráulica**

Neste capítulo serão abordados os resultados dos estudos já existentes sobre o comportamento do betão com adição de materiais pozolânicos.

---

Face à falta de estudos relativos ao comportamento de betão de cal hidráulica aditivado de materiais pozolânicos, neste ponto serão referidos os resultados obtidos pelas publicações “Hydraulic-lime based concrete: Strength development using a pozzolanic addition and different curing conditions” e “Effect of Portuguese metakaolin on hydraulic lime concrete using different curing conditions” dos autores Velosa et al. (2009) e Cachim et al. (2010) respectivamente. Neste capítulo são ainda apresentadas algumas das principais conclusões sobre o comportamento do betão de cimento Portland com adição de metacaulino existentes na literatura.

## **3.1. Comportamento do betão de cal hidráulica com adição de resíduos de argila expandida**

### **3.1.1. Propriedades do betão enquanto fresco**

O betão de cal hidráulica aditivado com resíduos de argila expandida apresenta uma fraca trabalhabilidade, pois os abaixamentos verificados pelo teste de Slump para as diferentes misturas em estudo foram de 1,5 cm tratando-se da mistura sem adição de resíduos de argila expandida, de 0,9 cm valor registado pela mistura cuja percentagem de substituição parcial de cal hidráulica por resíduos de argila expandida foi de 20% e de 0,5 cm tratando-se da mistura onde a substituição parcial de cal hidráulica foi de 30%. Relativamente à densidade do betão produzido esta apresentou-se aproximadamente constante, com valor de  $2290 \text{ kg/m}^3$  (Velosa et al., 2009).

### **3.1.2. Propriedades do betão endurecido**

#### **3.1.2.1. Resistência à compressão**

Velosa et al. (2009) analisaram a capacidade resistente do betão de cal hidráulica aditivado com resíduos de argila expandida, tendo o betão evidenciado melhorias na sua resistência com esta adição pozolânica. Através deste estudo concluíram que no betão com substituição parcial da cal hidráulica por resíduos de argila expandida é mais evidente a influência da água na resistência á compressão, verificando-se os maiores valores de resistência para as condições de cura de 95% de humidade relativa e imersão para idades superiores aos 7 dias. Aos 7 dias os provetes curados em condições de 65% de humidade relativa apresentam os melhores resultados relativamente à sua capacidade resistente independentemente da mistura, no entanto apenas a composição sem adição de resíduos de argila mantém esta tendência também aos 28 dias. Do estudo referido concluíram ainda que a adição de resíduos de argila expandida só produz uma alteração significativa relativamente á resistência à compressão aos 90 dias de cura (Tabela 3.1.)

Tabela 3.1. Resistência de compressão para as diferentes misturas aos 7, 28 e 90 dias (Velosa et al., 2009)

Séries	Resistência de compressão (MPa)			Desvio padrão (MPa)		
	7 dias	28 dias	90 dias	7 dias	28 dias	90 dias
M0-65	6,6	8,9	10,2	0,16	0,21	0,81
M0-95	5,0	8,3	11,1	0,24	0,57	0,27
M0-W	3,3	5,6	10,5	0,15	0,21	0,01
M2-65	6,0	9,4	13,2	0,40	0,47	0,78
M2-95	5,5	11,1	18,4	0,14	0,29	0,53
M2-W	4,0	8,8	14,5	0,09	0,08	0,56
M3-65	4,9	8,6	11,5	0,26	0,88	0,75
M3-95	4,6	10,8	26,6	0,21	0,10	0,92
M3-W	4,9	9,6	18,5	0,30	0,33	0,56

Quanto à comparação entre os valores de resistência à compressão e os de resistência à tracção, os resultados obtidos são inferiores aos presentes no EC2 referentes ao betão de cimento Portland, a maioria dos pontos encontra-se abaixo da curva proposta pelo EC2 (Figura 3.1.). A quantidade de água utilizada sem adição de plastificante é uma das razões apresentadas para estes resultados, no entanto não se verificaram quaisquer fissuras no betão (Velosa et al., 2009).

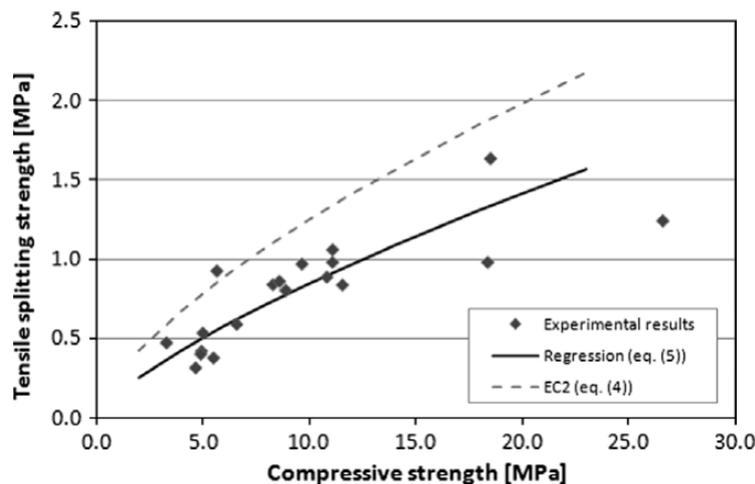


Figura 3.1. Comparação entre força de compressão e tensão de tracção e a respectiva curva do EC2 (Velosa et al., 2009)

### 3.1.2.2. Reactividade pozolânica

Velosa et al. (2009) verificaram que após os 28 dias de idade nos provetes com condições de cura de 95% e imersão o aumento da parcela de resíduos de argila expandida de 20% para 30% contribui positivamente para a resistência final (Relação evidenciada na figura 3.2). A idade contribui positivamente para a evolução do índice pozolânico tratando-se da mesma mistura e quando esta tem iguais condições de cura. Os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que as condições de cura são muito influentes para o desenvolvimento do índice pozolânico, apresentando o betão melhores resultados para condições de cura de 95% de humidade relativa.

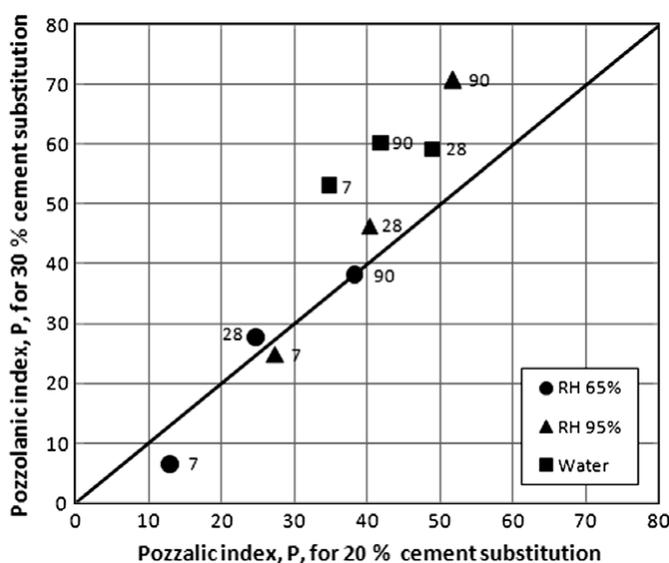


Figura 3.2. Relação do índice pozolânico nos betões de cal onde esta é substituída por 20% e 30% por resíduos de argila nas diferentes condições de cura (Velosa et al., 2009)

### 3.1.3. Principais conclusões sobre o comportamento do betão de cal hidráulica aditivado com resíduos de argila expandida

No estudo aqui referenciado Velosa et al. (2009) concluíram que os resíduos de argila são indicados para a melhoria das propriedades do betão de cal hidráulica, visto que conferiram um aumento da resistência á compressão, tanto em percentagens de 20% como de 30%. De salientar a influência das condições de cura nos valores de resistência obtidos para as idades de 28 e 90 dias, produzindo-se melhores resultados quando a cura á feita a 95% de humidade.

Através deste estudo, também se verificou que os testes realizados aos 7 dias não permitem aferir a evolução no comportamento do betão de cal hidráulica aditivado com resíduos

de argila expandida. As reacções de carbonatação que ocorrem com os materiais pozolânicos se desenrolam mais demoradamente que as reacções de hidratação que ocorrem para o betão com cimento Portland, esta diferença deve-se ter em atenção na aplicação dos ensaios referentes a betão de cimento Portland, pois podem não ser indicados (Velosa et al., 2009).

O betão de cal hidráulica é indicado para obras em que a resistência mecânica exigida seja menor, utilizando-se assim um material sustentável diminuindo o consumo de cimento Portland (Velosa et al., 2009).

## **3.2. Comportamento do betão de cal hidráulica aditivado com metacaulino português**

### **3.2.1. Propriedades do betão enquanto fresco**

De acordo com Cachim et al. (2010), o betão de cal hidráulica aditivado com metacaulino português apresenta também níveis de trabalhabilidade reduzidos, tendo-se verificado abaixamentos de 1,5 cm, 0,8 cm e 1,6 cm consoante a percentagem de substituição parcial de cal hidráulica por metacaulino português fosse respectivamente de 0%, 20% e 30%. Relativamente à densidade atingida pelas diferentes misturas esta teve valor de 2240 kg/m<sup>3</sup> para a mistura sem adição de metacaulino, de 2220 kg/m<sup>3</sup> na mistura com substituição parcial de cal hidráulica por metacaulino em 20% e de 2160 kg/m<sup>3</sup> tratando-se da em que esta substituição foi de 30%.

### **3.2.2. Propriedades do betão quando endurecido**

#### **3.2.2.1. Resistência à compressão**

Cachim et al. (2010) verificaram que só aos 7 dias de cura e com humidade relativa de 65% a adição de metacaulino não tem como consequência um aumento de resistência á compressão do betão. Deste estudo concluíram que até aos 28 dias os provetes imersos apresentam uma menor resistência comparativamente aos submetidos a condições de húmidade relativa de 65% e 95%, no entanto a partir desta idade esta diferença entre os valores de resistência originada pelas condições de cura tende a desaparecer. O betão aditivado com metacaulino sujeito a imersão, até 28 dias apresenta sempre uma menor resistência que o betão

com condições de cura de 95% de humidade relativa, no entanto, aos 90 e 360 dias esta tendência é revertida. Através deste estudo verificaram que até aos 28 dias a adição de metacaulino tem como consequência um incremento do valor de resistência, decrescendo depois deste tempo de cura. O benefício da adição de metacaulino ao betão sofre uma redução com o aumento da quantidade de metacaulino de 20% para 30% (Tabela 3.2.).

Tabela 3.2. Resistência à compressão para as diferentes misturas aos 7, 28, 90 e 360 dias (Cachim et al., 2010)

Séries	Resistência de compressão (MPa)				Desvio padrão (MPa)			
	7 dias	28 dias	90 dias	360 dias	7 dias	28 dias	90 dias	360 dias
M0-65	6,6	8,9	10,2	11,8	0,16	0,21	0,81	0,72
M0-95	5,0	8,3	11,1	10,1	0,24	0,57	0,27	0,37
M0-W	3,3	5,6	10,5	9,6	0,15	0,21	0,01	0,28
M2-65	6,5	15,7	16,5	12,2	0,15	0,47	0,21	0,64
M2-95	7,2	17,5	19,3	13,3	0,15	0,21	0,50	0,66
M2-W	6,1	16,8	20,0	14,5	0,21	0,81	1,28	0,83
M3-65	6,8	13,4	14,5	12,2	0,10	0,49	0,38	0,53
M3-95	6,8	12,8	15,1	11,9	0,21	0,68	0,40	0,29
M3-W	6,0	12,8	15,7	12,0	0,12	0,20	0,31	0,21

### 3.2.2.2. Reactividade pozolânica

De acordo com Cachim et al. (2010) a adição de metacaulino tem sempre um efeito positivo na melhoria da resistência do betão, sendo esta tendência mais evidente aos 28 dias e decrescendo para idades superiores. Inicialmente a mistura com 30% de metacaulino não tem tanto efeito na melhoria do betão comparativamente ao evidenciado pela mistura com 20%, no entanto, com o tempo a influência de ambas as percentagens é semelhante. Deste estudo concluíram também que a contribuição do efeito pozolânico no desenvolvimento da resistência é máximo aos 28 dias, decrescendo depois desta idade. A eficiência do efeito pozolânico é superior quando as condições de cura são de 95% de humidade relativa ou imersão quer para a mistura com substituição parcial de cal hidráulica em 20% quer para a mistura com 30%.

Cachim et al. (2010) concluíram que tanto as reacções de hidratação como as pozolânicas contribuem para o aumento da resistência de compressão do betão. Da análise térmica foi ainda tida como conclusão que a quantidade de calcite não possui relação directa com a resistência á compressão.

### 3.2.3. Principais conclusões

O metacaulino é um material pozolânico apropriado para adição a betão de cal hidráulica, pois a sua adição resulta num betão de maior resistência à compressão. A mistura com 20% de metacaulino obtém melhores resultados comparativamente com a substituição de 30%. Os testes realizados aos 7 dias não permitem aferir o comportamento futuro do betão, pois as reacções no betão de cal hidráulica são mais demoradas que no betão produzido com cimento Portland (Cachim et al., 2010).

As condições de cura produzem mudanças significativas no efeito da adição de metacaulino ao betão de cal hidráulica, atingindo-se melhores resultados nos casos em que a cura é feita por imersão ou com humidade relativa de 95%, devido ao processamento das reacções químicas (Cachim et al., 2010).

## 3.3. Comportamento do betão de cimento portland aditivado com metacaulino

### 3.3.1. Propriedades do betão enquanto fresco

A adição de metacaulino ao betão de cimento portland tem como consequência a redução do abaixamento bem como do tempo de presa do betão. Para a mesma quantidade de superplastificante mantendo-se a razão água/ligante a incorporação de metacaulino provoca uma diminuição da fluidez do betão (Brooks et al., 2001 e Li et al. 2003).

Tabela 3.3. Trabalhabilidade e tempos de presa do betão aditivado com metacaulino (Brooks et al., 2001)

Misturas de betão	Abaixamento (mm)	Tempo de assentamento inicial (horas)	Tempo de assentamento final (horas)
CP	100	5	7,7
MK5	30	6,42	8,82
MK10	20	6,98	9,42
MK15	5	6,45	9,31

Quando a adição de metacaulino é feita em quantidades inferiores a 5% da quantidade de cimento a trabalhabilidade do betão não é afectada. Já para adições de metacaulino em quantidades superiores a trabalhabilidade deve ser controlada com adição de superplastificantes (Quian et al. 2001).

### 3.3.2. Propriedades do betão endurecido

#### 3.3.2.1. Módulo de elasticidade

Qian et al. (2001) estudaram a evolução do módulo de elasticidade do betão de cimento Portland aditivado de metacaulino de acordo com a percentagem de metacaulino e a idade do betão. O módulo de elasticidade aumenta com o aumento da percentagem de metacaulino da mistura, no entanto o aumento evidenciado não é muito relevante.

Tabela 3.4. Módulo de elasticidade com diferentes quantidades de metacaulino (Qian et al., 2001)

Séries	Módulo de elasticidade médio (GPa)		
	3 dias	28 dias	60 dias
MK0	24,1	30,0	30,4
MK5	25,6	31,5	33,1
MK10	26,0	33,2	34,4
MK15	26,2	33,2	34,7

#### 3.3.2.2. Resistência à compressão

Wild et al. (1996) concluíram que o betão com substituição parcial de cimento Portland por metacaulino apresentava uma melhoria na sua resistência à compressão, registando o betão com substituição parcial de cimento por metacaulino de 20% os melhores resultados. No entanto, outros autores concluíram que percentagens menores de metacaulino apresentavam melhores resultados relativamente ao acréscimo da resistência à compressão. De acordo com Brooks et al. (2001) a percentagem de substituição de cimento Portland por metacaulino ideal é de 10%.

Tabela 3.5. Resistência de compressão do betão de controlo e das misturas (Poon et al., 2006)

Séries	a/l	Mistura	Resistência à compressão (MPa)			
			3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
1	0,3	Controlo	68,50	81,10	96,50	102,50
		5% MK	73,00	88,20	103,60	112,90
		10% MK	85,90	99,80	116,80	120,30
		20% MK	70,80	87,60	99,60	113,80
2	0,5	Controlo	28,60	41,20	52,10	60,40
		5% MK	32,60	45,90	57,10	66,50
		10% MK	40,40	55,20	66,20	71,60
		20% MK	30,00	43,20	58,40	69,10

De acordo com Poon et al. (2006) o betão com substituição de cimento em 10% por metacaulino apresenta os melhores resultados quanto à resistência de compressão, de notar que todas as misturas de betão apresentam um incremento de resistência à compressão ao longo do tempo. Qian et al. (2001) verificaram que a resistência à compressão do betão é melhorada para percentagens de metacaulino até 15%.

### 3.3.3. Durabilidade

#### 3.3.3.1. Resistência à carbonatação

Sampaio et al. (2001) concluíram que a profundidade de carbonatação máxima dos provetes de betão diminui com a adição de metacaulino, com uma adição de 10% de metacaulino a profundidade máxima de carbonatação sofre uma diminuição de cerca de 56% (figura 3.3.).

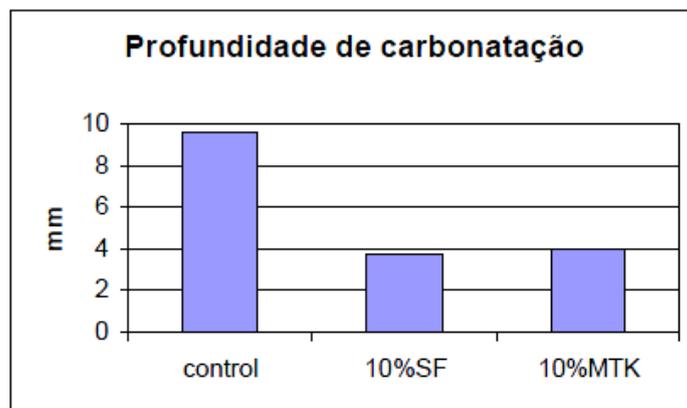


Figura 3.3. Profundidade de carbonatação média após ensaio acelerado em provetes dos diferentes tipos de betão (Sampaio et al., 2001)

### 3.3.3.2. Resistência à penetração de cloretos

A adição de materiais pozolânicos permite aumentar a durabilidade do betão, diminuindo a permeabilidade aos iões cloretos. A percentagem de material pozolânico ideal para a diminuição da permeabilidade do betão depende da razão a/l, apresentando o betão com razão a/l=0,3 os melhores resultados com a substituição de cimento portland em 10% por metacaulino e o betão com razão a/l=0,5 melhores resultados para a percentagem de metacaulino de 15% (Poon et al., 2006)

Tabela 3.6. Permeabilidade dos cloretos em betões de controlo e misturas (Poon et al., 2006)

Séries	a/l	Mistura	Total de carga passada (C)			
			3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
1	0,3	Controlo	2461	2151	1035	931
		5% MK	1327	1244	862	646
		10% MK	417	347	199	135
		20% MK	406	395	240	124
2	0,5	Controlo	5312	4054	2971	2789
		5% MK	4215	3765	2071	1065
		10% MK	1580	1247	918	752
		20% MK	751	740	640	580

Gruber et al. (2001) referem que em ambientes ricos em cloro as reduções de permeabilidade do betão através de adição de metacaulino podem ter uma grande influência no tempo de vida útil da estrutura. Neste estudo concluíram que a adição de metacaulino de alta reactividade como substituição parcial do cimento Portland em percentagens de 8% e 12%,

permitem uma diminuição na permeabilidade, apresentando o betão com razão  $a/l=0,3$  e percentagem de metacaulino de 12 % os melhores resultados para todas as idades em estudo. Os resultados obtidos com uma substituição de 12% e razão  $a/l=0,3$  são semelhantes aos alcançados pelo betão com percentagem de metacaulino de 8% e razão  $a/l=0,4$  para as idades entre 1 ano e 3 anos. O coeficiente de difusão dos iões cloretos diminui com a idade do betão, factor que se deve ter em conta nas previsões de durabilidade das estruturas.

A adição de matérias pozolânicos ao betão de cimento Portland melhora a microestrutura do betão e a sua capacidade de fixação de iões cloreto, aumentando a resistência à penetração de iões cloreto (Batis et al., 2005).

### 3.3.3.3. Resistência aos sulfatos

As estruturas expostas a ambientes ricos em sulfatos sofrem expansão, fissuração e deterioração. A adição de metacaulino ao betão de cimento Portland resulta num incremento considerável na sua resistência aos sulfatos, uma vez que a durabilidade do betão sem adição de metacaulino foi reduzida. Percentagens de substituição de metacaulino em 10% e 15% produziram um betão com durabilidade bastante elevada (Arikan et al., 2009).

### 3.3.3.4. Reacção alcalis-silica

De acordo com Silva (2006) a adição de metacaulino ao betão de cimento Portland permite inibir a expansão originada pela reacção alcalis-silica através do consumo de hidróxido de carbono pela reacção alcalis-silica.

Ramlochan et al. (2000) verificaram que o principal mecanismo de inibição da expansão originada pela reacção alcalis-silica é a retenção dos alcalis pelos hidratos suplementares, o que resulta numa diminuição do pH nas soluções dos poros.



## **4. Durabilidade do betão**

Neste capítulo apresentam-se algumas noções sobre a durabilidade das estruturas de betão armado e a sua influência no desempenho destas estruturas. São referidos neste capítulo os principais fenómenos que originam a corrosão das armaduras, analisados neste trabalho.

---

### **4.1. Importância do estudo da durabilidade do betão**

Simas (2007) refere que “A vida útil de uma construção pode ser definida como o período de tempo, após entrada em serviço, durante o qual esta conserva os seus requisitos de projecto sem recurso a qualquer intervenção profunda ou custos inesperados de manutenção. Sob o ponto de vista da durabilidade, o período de vida útil é condicionado pela penetração de substâncias agressivas para o betão e pelas reacções destrutivas que originam com os componentes do betão armado. De entre essas, a corrosão das armaduras condiciona, na generalidade dos casos, a vida útil da estrutura.”

Devido à facilidade de fabrico e aplicação, baixa manutenção e bom desempenho o betão tem sido um dos materiais mais utilizados na construção. No entanto, o betão armado quando sujeito a condições de exposição desfavoráveis pode sofrer uma redução significativa na sua durabilidade (Simas, 2007).

Uma das propriedades mais importantes dos materiais cimentícios é a sua durabilidade, pois esta propriedade está associada ao tempo de serviço das estruturas, sendo propriedade influenciada pela interacção do material com o ambiente (Benal et al., 2010).

Nos últimos anos o número de estruturas de betão armado com anomalias originadas pela corrosão das armaduras tem sofrido um aumento significativo, o que provocou um aumento considerável nos gastos de reparação e reforço deste tipo de estruturas. O nível de deterioração das estruturas de betão armado tem grande influência no seu desempenho, a corrosão de armaduras é o tipo de deterioração que mais afecta as estruturas de betão. A corrosão consiste na desintegração electroquímica do metal quando exposto a ambientes agressivos. Este processo provoca expansão, originado pelo volume elevado dos produtos de corrosão, o que pode levar ao aparecimento de fendas e fragmentação do betão, perda de aderência e redução da secção das armaduras, tendo assim consequências nefastas para a rigidez da estrutura (Monteiro et al., 2011, Song et al., 2009).

Como o betão é um material alcalino, o aço no seu interior encontra-se protegido quanto à corrosão, a alcalinidade do betão favorece a formação de uma camada de óxidos passivante, compacta e aderente de  $Fe_2O_3$  na superfície das armaduras. Quando a integridade desta camada é mantida, o aço não sofre corrosão, para tal o betão tem que manter as suas características físicas e químicas. As principais origens da corrosão das armaduras presentes no betão armado são a carbonatação e a contaminação por iões cloreto (Simas, 2007).

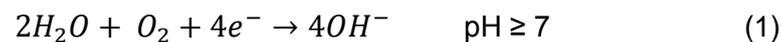
## 4.2. Resistência à carbonatação

A carbonatação do betão armado depende das características dos materiais do betão e do ambiente a que este está exposto (Monteiro et al., 2011).

O fenómeno de carbonatação desenvolve-se através da penetração do  $CO_2$  na estrutura porosa do betão, desencadeando uma série de reacções químicas e físicas, as quais têm como principal consequência a diminuição do pH do meio e conseqüentemente o desencadeamento do fenómeno de corrosão das armaduras (Simas, 2007).

Simas (2007) refere que o fenómeno de corrosão tem funcionamento semelhante ao de uma pilha, apresentando o betão armado um ânodo onde ocorre a oxidação electroquímica, um cátodo onde se realiza a redução electroquímica e um electrólito onde circula a corrente iónica, sendo este constituído pela solução intersticial aquosa que contem iões em solução. Estes

componentes formam um circuito fechado, iniciando-se a corrosão para determinados valores de diferença de potencial. A presença de dióxido de carbono no electrólito acentua a diferença de potencial, levando à dissolução da camada passiva existente na superfície das armaduras. Nas zonas não corroídas (catódicas) ocorre redução de oxigénio (equações 1 e 2) e nas zonas corroídas (anódicas) dá-se a dissolução do metal a partir da superfície (equação 3). O processo catódico depende do pH e do oxigénio dissolvido da interface Betão/armadura. As principais reacções químicas inerentes ao processo de carbonatação são as seguintes:



Na determinação dos níveis de carbonatação, o método mais utilizado é realizado por aspersão de fenolftaleína, no entanto este método apenas permite distinguir as zonas onde ocorreu carbonatação das não carbonatadas. A existência de fendas no betão propicia o fenómeno de carbonatação, uma vez que permite o rápido acesso do dióxido de carbono ao interior do betão. De formas diferentes, mas todas as estruturas de betão armado estão sujeitas ao fenómeno de carbonatação uma vez que o dióxido de carbono é um dos constituintes da atmosfera (Simas, 2007).

### 4.3. Resistência à penetração de cloretos

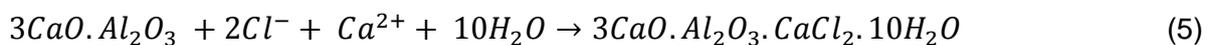
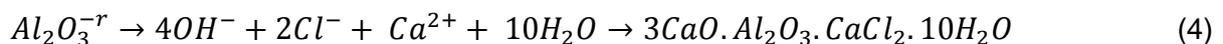
Os iões cloreto ao entrar em contacto com a camada passiva da armadura destroem esta camada formando um ânodo na superfície do aço, tornando-se a camada passiva um cátodo. Os iões de cloreto têm assim que estar em contacto directo com o aço para originar o fenómeno de corrosão. A entrada de iões cloreto no betão pode ser realizada por vários métodos distintos: por absorção, por permeabilidade, por difusão, por pressão e através de um fenómeno onde a absorção de água e a difusão do vapor de água são combinadas (Mcpolin et al., 2005, Song et al., 2008).

Nas estruturas modernas, em que a camada de recobrimento é suficientemente espessa, o principal meio de transporte dos iões cloreto para o interior do betão é por difusão (Song et al., 2008).

A avaliação da resistência à penetração de iões cloreto do betão pode ser realizada através de diversos métodos. Estes métodos podem ser agrupados em duas categorias distintas: de transporte lento, obtida através de gradientes de concentração por saturação do betão, e de transporte acelerado por campos eléctricos (Jain et al., 2011).

O sal de Friedel (Fs) está englobado num conjunto de compostos geralmente designados como aluminatos de cálcio ou fases de ferrite de hidratos monosubstituídos, este tipo de compostos apresentam na fase cristalina a aparência de placas hexagonais (Bothe et al., 2004).

A formação de sal de Friedel, com composição química  $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ , em misturas de cimento Portland com adição de pozolanas, resulta fundamentalmente do teor da pozolana em alumina reactiva. De notar que existe formação de Fs devido ao teor de alumina da pozolana mas também devido ao teor de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) do cimento, no entanto este teor tem uma influência significativamente menor que o anterior. O sal de Friedel originado pela alumina reactiva da pozolana é designado como Fs de formação rápida enquanto que o originado pelo aluminato tricalcico é designado como Fs de formação lenta. A equação 4 representa a reacção que dá origem ao sal de Friedel de formação rápida, enquanto que a equação 5 diz respeito à reacção de sal de Friedel de formação lenta (Talero et al., 2011).



Thomas et al. (2011) analisaram o efeito dos materiais cimentícios suplementares na fixação de cloretos na pasta de cimento em estado endurecido, tendo concluído que determinadas quantidades de alumina, através da formação de sal de Friedel, melhoram a capacidade de fixação de cloretos.

## **5. Sistematização e justificação dos materiais utilizados e da metodologia do produção de betão**

Neste capítulo procede-se à descrição dos materiais utilizados na produção do betão, expondo-se o método utilizado na determinação da composição do betão. Descrevem-se ainda neste ponto a metodologia adoptada na produção do betão e a forma de acondicionamento dos provetes durante o tempo de cura.

---

Na realização deste trabalho foram realizadas três composições de betão, no entanto, estas apenas diferem entre si na inclusão ou não do metacaulino como substituição parcial da cal hidráulica, ou seja, todas as composições possuem a mesma quantidade de água e agregados variando a quantidade de cal hidráulica e metacaulino. Na produção do betão foi utilizada uma quantidade de água de 0,5 do volume de ligante, foi ainda utilizado superplastificante tendo este sido doseado de forma a serem obtidas composições com semelhante trabalhabilidade do betão.

## 5.1. Composição do betão

Sendo o betão composto por agregado, cimento, água e um determinado volume de ar que é impossível de retirar por melhor que seja o processo de compactação, podemos facilmente verificar que o volume de betão é dado pelo somatório entre o volume de agregado,  $i$ , o volume de água,  $e$ , o volume de cimento,  $c$ , e o volume de ar,  $v$  (Coutinho, 1997).

$$1 = i + e + c + v$$

Existem vários parâmetros cujo conhecimento se torna fundamental para se determinar a composição do betão, estes parâmetros são geralmente dependentes uns dos outros pois um ou dois parâmetros podem levar à manifestação de outro. Os parâmetros necessários para a definição da composição do betão são (Coutinho, 1997):

- a) A dosagem de cimento;
- b) A composição do agregado,
- c) A massa volúmica de todos os componentes do betão;
- d) A relação água/cimento pretendida;
- e) O volume de vazios;
- f) A trabalhabilidade do betão.

Na determinação da composição de betão devemos ambicionar o máximo de compacidade possível sem colocar em causa a trabalhabilidade do betão. Existem vários métodos para o cálculo da composição granulométrica do betão, sendo o método das curvas de referência o mais utilizado. Este método permite calcular a composição do betão tendo apenas como análise experimental as granulometrias de agregado e eventualmente uma amassadura para ajustar a dosagem de água. A composição do betão é determinada sem grande dificuldade através de cálculos ou de análise gráfica (Coutinho, 1997).

Existem várias curvas de referência, sendo as mais utilizadas as de Bolomey, Faury e Joisel, estas curvas têm em consideração as condições de colocação de betão, especialmente a sua trabalhabilidade. A determinação da composição do betão utilizando estas curvas tem ainda como vantagem o facto de tornarem a dosagem de cimento uma consequência da composição do agregado indo de encontro com a teoria de Feret, pois incluem o cimento. Estas curvas

podem ser traçadas descontando o cimento, procedendo-se aos ajustamentos desprezando a sua presença, ou considerando o cimento fazendo-se os ajustamentos tratando o cimento como componente do betão cuja percentagem é conhecida. Como a dosagem de cimento é muitas vezes uma incógnita do problema por razões de resistência mecânica ou de durabilidade, este método é muitas vezes aplicado pois permite ignorar a presença do cimento (Coutinho, 1997).

### 5.1.1. Materiais utilizados

Neste ponto serão descritos todos os materiais utilizados na produção das misturas realizadas neste trabalho.

#### 5.1.1.1. Agregados

Na produção do betão foram utilizados três tipos de agregados com granulometrias distintas, diferindo quer relativamente á forma quer relativamente á dimensão. Foi utilizada areia crivada, e dois tipos de brita, brita fina e brita grossa, ambas de origem calcária, designadas respectivamente por brita 8/12 e brita 12/25 (figura 5.1).



Figura 5.1. Agregados utilizados neste trabalho. Da esquerda para a direita: Brita grossa (brita 12/25), Brita fina (Brita 8/12) e areia.

A análise granulométrica dos diferentes agregados foi realizada pelo laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Na figura 5.2 são representadas as curvas

granulométricas dos mesmos, tendo estas sido traçadas com base nos resultados obtidos pela peneiração individual dos diferentes tipos de agregados.

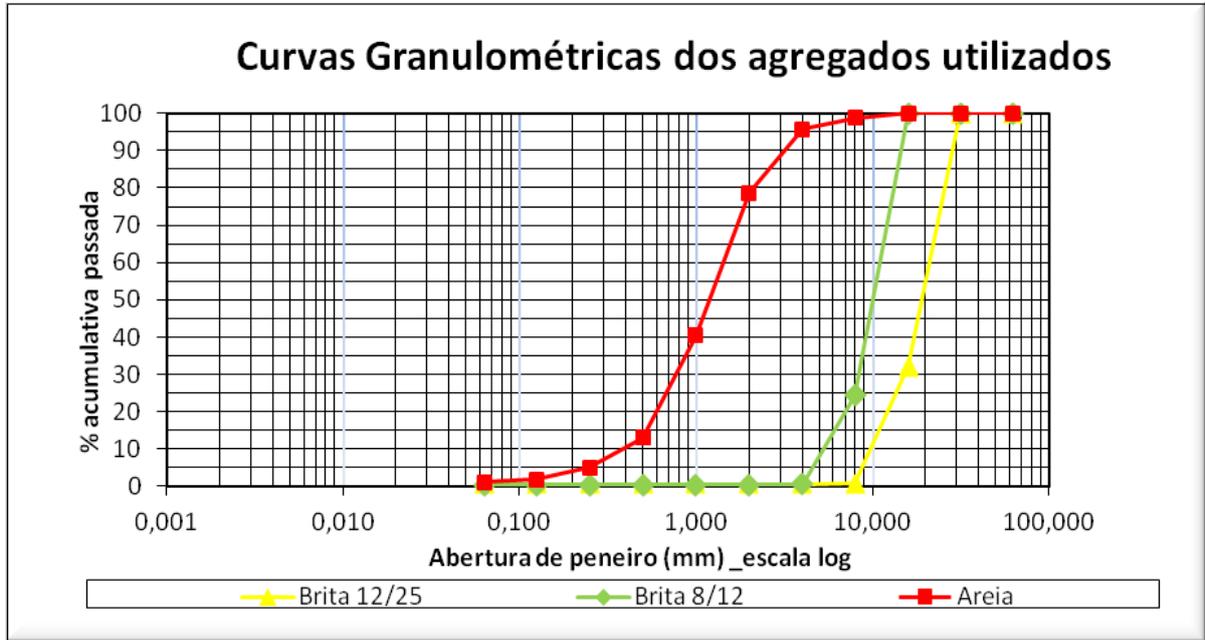


Figura 5.2. Representação das curvas granulométricas dos três tipos de agregados utilizados na produção do betão

Através da análise das curvas granulométricas podemos concluir que ambas as britas detêm pouca variabilidade relativa á dimensão do grão, apresentando a brita fina a maioria dos grãos com dimensões entre os 8 e os 16 mm e a brita grossa entre os 8 e os 20 mm. A areia apresenta já uma maior variabilidade na dimensão de grãos, estando no entanto a sua maioria compreendida entre os 0,25 e os 4 mm.

### 5.1.1.2. Cal Hidráulica (NHL5) como ligante

No panorama nacional existem poucas fábricas que produzem matéria-prima uniforme, pois é difícil executar em condições económicas explorações separadas, consoante as diferentes percentagens de argila existentes no calcário o que leva a que os materiais sejam misturados resultando como produto final um só tipo de cal.

A cal hidráulica utilizada na produção de betão foi a cal NHL5, Lafarge, de origem francesa (figura 5.3).



Figura 5.3. Cal hidráulica (NHL5) utilizada neste trabalho

A cal hidráulica NHL3/5-Z de Lafarge, é obtida através do aquecimento do calcário margoso a mais de 1000°C, tendo este uma percentagem de argila entre 5 e 20%, como já foi referido no presente documento, no entanto, esta cal tem a particularidade de conter uma pequena percentagem de cimento que confere uma melhoria no início de presa.

#### 5.1.1.3. Metacaulino como adição pozolânica

Apenas na produção das composições M1 e M2 foi utilizado o metacaulino como adição pozolânica, tendo substituído parcialmente a quantidade de cal hidráulica, em respectivamente 10 e 20%. O metacaulino utilizado é de origem Portuguesa, tratando-se de metacaulino Argical M-1000 (ver figura 5.4).



Figura 5.4. Metacaulino, Argical M-1000

O metacaulino Argical M-1000 é uma pozolana artificial. Este material assume uma forma amorfa não cristalizada, constituída por partículas lamelares.

Tabela 5.1. Propriedades químicas do metacaulino

Elemento	%
SiO <sub>2</sub>	55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	0,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,4
TiO <sub>2</sub>	1,5
CaO + MgO	0,3

#### 5.1.1.4. Superplastificante

A utilização de superplastificante na produção do betão advém da necessidade de conferir ao betão uma maior trabalhabilidade, tendo sido doseado para as diferentes composições de forma a ser atingida mesma trabalhabilidade do betão nas diferentes composições.

O superplastificante utilizado é de origem portuguesa, designado por Sika Viscocrete 3002 HE, este adjuvante actua sobre as partículas do ligante essencialmente através de dois mecanismos distintos: por absorção superficial e por efeito espacial, estes dois mecanismos produzem um efeito dispersante intenso, que resulta numa redução elevada do consumo de

água de amassadura. A adição deste adjuvante á composição também leva a que a cinética das reacções químicas de hidratação do cimento sejam aceleradas.

### 5.1.2. Misturas realizadas

O método utilizado para a determinação da composição granulométrica do betão foi o método gráfico de Faury, tendo sido feito o acerto da curva de referência, foi utilizado este método uma vez que considera a existência do cimento para a formulação da composição.

Após a formulação granulométrica dos componentes do betão, ou seja, após determinação da quantidade de agregados, ligante e água procedeu-se á produção do betão medindo minuciosamente essas quantidades. O cálculo referente às quantidades de materiais utilizados na produção do betão encontra-se descrito nas tabelas presentes no APÊNDICE I.

Foram realizadas três misturas distintas na produção de betão, nas quais a dosagem de cal hidráulica foi substituída parcialmente por metacaulino nas percentagens de 0%, 10% e 20%.

De forma a facilitar a referenciação dos provetes, foi adoptada a seguinte nomenclatura M0, M1 e M2 tratando-se respectivamente das misturas em que a cal era substituída respectivamente por 0%, 10% e 20% (ver tabela 5.2.). Todos os provetes foram datados de forma a se identificar o dia de produção do betão e assim determinar posteriormente a idade dos provetes.

Tabela 5.2. Quadro com as composições realizadas de acordo com a percentagem de cal hidráulica

Referência	Constituintes (kg/m <sup>3</sup> )						Percentagem de cal NHL5 (%)
	Brita 12/25	Brita 8/12	Areia	Cal NHL5	Metacaulino	água	
M0	615,2	252,1	767,9	350	-	175	100
M1	615,2	252,1	767,9	315	35	175	90
M2	615,2	252,1	767,9	280	70	175	80

## 5.2. Produção do betão

A amassadura do betão tem como objectivo levar a que todas as particulas de agregado sejam revestidas com pasta de cimento, de forma a que todos os componentes do betão formem um todo homogéneo. De notar que a descarga de betão do sistema que realiza a amassadura

deve ser feita de modo a que não seja perturbada a uniformidade do produto final (Coutinho, A., 1997).

Na produção de betão foi utilizada uma betoneira de eixo inclinável, que se encontra representada na figura seguinte.



Figura 5.5. Betoneira utilizada na amassadura do betão

A colocação dos materiais na betoneira seguiu a seguinte ordem, primeiramente foram colocados os agregados dos mais grossos aos mais finos, posteriormente colocou-se a cal hidráulica e o metacaulino caso se trata-se das misturas M1 e M2 e finalmente colocou-se a água. O superplastificante foi adicionado á agua logo foi lançado na betoneira aquando desta.

### **5.3. Colocação do betão em moldes e vibração**

Na produção dos provetes foram utilizados moldes com dimensões de 100x100x100 [mm<sup>3</sup>]. Todos os moldes utilizados foram previamente limpos e lubrificados com óleo descofrante.



Figura 5.6. Moldes utilizados na produção dos provetes de 100x100x100 [mm<sup>3</sup>]

Após colocação do betão nos provetes de forma a se atingir uma adequada compactação do betão, utilizou-se um vibrador agulha, tendo sido seguidas as indicações presentes na norma NP EN 12390-2 (2009), relativas á execução e cura de provetes para ensaios de resistência á compressão. Para finalizar o processo de produção dos provetes aplanou-se a superfície dos provetes com o auxílio de uma talocha.

#### 5.4. Acondicionamento dos provetes

Procedeu-se á descofragem dos provetes após 72 horas da sua produção, altura em que estes possuíam resistência suficiente para manter a geometria. Após descofragem os provetes foram devidamente identificados de forma a indicarem a mistura (M0, M1 ou M2) e a data de produção. Depois de identificados foram colocados em câmara húmida, com humidade relativa de 95% e temperatura média de 20°C, na qual foram mantidos durante todo o tempo de cura (ver figura 5.7).



Figura 5.7. Armazenagem dos provetes em câmara húmida

## **6. Sistematização e justificação dos ensaios realizados**

No presente capítulo procede-se á descrição de todos os ensaios experimentais realizados neste trabalho.

---

A resistência à compressão é o parâmetro mais utilizado para avaliar a qualidade do betão, no entanto, há uma preocupação crescente pela durabilidade do betão armado devido ao frequente aparecimento de estruturas degradadas. O desempenho do betão relativamente à sua durabilidade deve também ser avaliado. A interacção entre a camada superficial do betão com o meio ambiente é essencial para o início de diversos processos de degradação. A avaliação das propriedades de transporte da camada superficial fornecem informações quanto à durabilidade do betão (Ferreira et al., 2001).

## 6.1. Ensaio de abaixamento (slump test)

De acordo com Coutinho (1997<sub>2</sub>) “A maior ou menor facilidade com que um betão é transportado, colocado, adensado e acabado e a maior ou menor facilidade com que se desagrega ou segrega durante estas operações é designada pelo termo genérico de trabalhabilidade.”

O conceito de trabalhabilidade envolve inúmeras propriedades do betão o que leva a que a sua medição seja feita por mais de que um método. Os métodos utilizados na determinação das características do betão em estado fresco dividem-se em duas categorias distintas, sendo estas: a dos métodos que determinam as propriedades físicas que por sua vez caracterizam os parâmetros reológicos do betão e a dos métodos que medem a propriedade tecnológica chamada trabalhabilidade, avaliando pelo menos um dos seus aspectos (Coutinho, 1997<sub>2</sub>).

Existem inúmeros métodos para avaliar a trabalhabilidade, como já foi referido, podendo ser classificados como: ensaios de penetração, ensaios de escoamento, ensaios de queda, ensaios de amassadura, ensaios de abaixamento, ensaios de compactação ensaios de deformação ou a combinação de mais que um dos anteriores ensaios (Coutinho, 1997).

### 6.1.1. Procedimento de ensaio

Os ensaios de abaixamento realizados neste trabalho seguiram os procedimentos descritos na norma portuguesa NP EN 12250-2 (2009), tendo-se tido ainda em consideração os procedimentos descritos em Fabrico e Propriedades do Betão, (Coutinho, 1997).

De notar que se teve especial cuidado na divisão das três camadas de compactação, tendo cada uma delas sido compactada através da aplicação de 25 pancadas com o varão de compactação. Após a retirada do cone de Abrams foi medido o abaixamento do betão (ver figura 6.1).



Figura 6.1. Ensaio de abaixamento realizado neste trabalho

## **6.2. Ensaio de determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons**

A realização deste ensaio consiste na medição do tempo de percurso de uma onda ultra-sónica a atravessar uma determinada extensão do betão em estudo. Deste ensaio retiramos como resultado a velocidade de propagação de ultra-sons, sendo a velocidade de propagação de ultra-sons afectada principalmente pela presença de vazios, humidade ou armaduras (Pereira, 1999).

A partir deste método podemos avaliar inúmeras características do betão, tais como: a uniformidade do betão, a existência de fendas, vazios ou defeitos, as mudanças ocorridas ao longo do tempo nas propriedades do betão, estimar a resistência à compressão e medir o módulo de elasticidade dinâmico ou estimar o estático (Pereira, 1999).

Realizaram-se ensaios de determinação de velocidade de propagação de ultra-sons em 9 provetes de cada composição de betão em estudo (M0, M1 e M2) em todas as idades em estudo, ou seja, aos 28, 90 e 180 dias.

### 6.2.1. Equipamento de ensaio

O equipamento utilizado na determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons foi o “PUNDIT” (Portable Ultrasonic Non-destructive Indicating Tester), a figura 6.2. ilustra os diferentes componentes do equipamento.

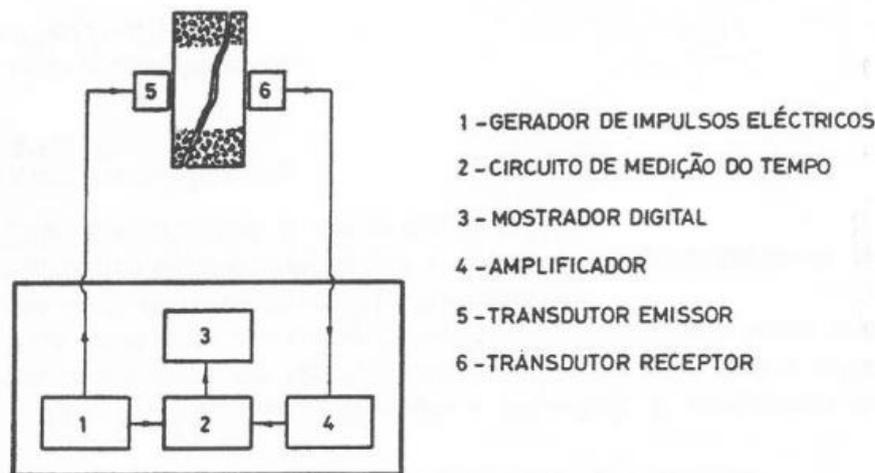


Figura 6.2. Esquema de aparelho de medida da velocidade de propagação de ultra-sons

Os transdutores descritos na figura anterior possuem frequências de ressonância de 54 kHz. Para além dos componentes acima ilustrados o aparelho utilizado possui uma unidade de ajustamento do tempo de percurso, para que seja possível proceder á aferição do equipamento. Este tipo de aparelho, quando devidamente aferido permite medir o tempo de percurso com uma exactidão de  $\pm 1\%$ .

### 6.2.2. Procedimentos de ensaio

Na realização do ensaio de determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons, seguiram-se os procedimentos presentes na norma portuguesa NP EN 12504-4 (2007).

Antes de se iniciar o ensaio procedeu-se à aferição do equipamento, sendo que para tal, foram limpas as superfícies dos transdutores e da barra de aferição tendo sido posteriormente colocada uma camada fina de material gorduroso entre estes, com o intuito de melhorar o contacto. A aferição foi feita fazendo coincidir o valor de leitura do aparelho, com o indicado na barra de aferição, neste caso 26  $\mu\text{s}$  (figura 6.3.).



Figura 6.3. Aferição do aparelho utilizado na medição da velocidade de propagação dos ultra-sons (PUNDIT)

Na execução do ensaio os transdutores foram colocados em faces opostas dos provetes, pois este tipo de transmissão, transmissão directa, é o tipo de transmissão mais satisfatório, visto que a máxima energia de impulso é transmitida segundo a direcção normal ao transdutor emissor e que a distância de percurso pode ser medida com grande precisão. Na figura seguinte (fig. 6.4.) são ilustrados os diferentes tipos de transmissão possíveis de ensaiar.

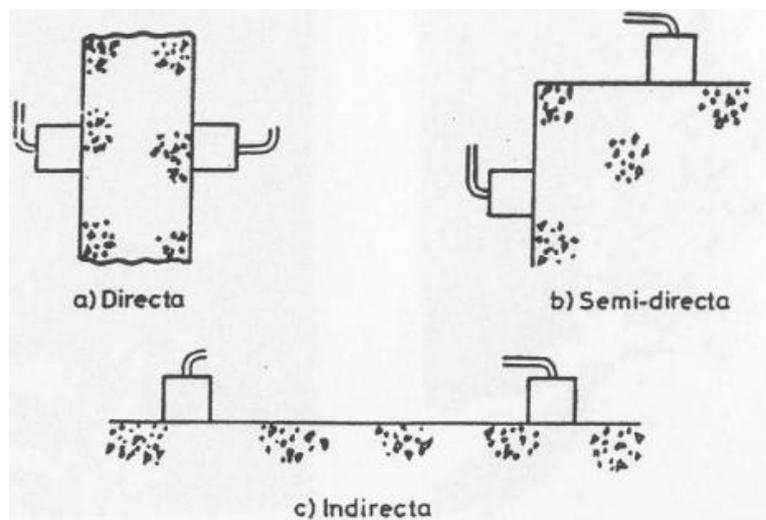


Figura 6.4. Tipos de leitura da velocidade de propagação dos ultra-sons

De notar que o contacto entre a superfície do provete e a superfície dos transdutores foi feita colocando entre estas uma camada muito fina e bem distribuída de material gorduroso de

forma a ser estabelecida a ligação, tal como no processo de aferição. Após estabelecida a ligação basta apenas registar-se o tempo de percurso fornecido pelo equipamento. Na execução deste ensaio foram registados dois valores de tempo de propagação de onda referentes às faces opostas do provete.

Conhecendo o tempo de percurso registado pelo equipamento e o comprimento do percurso, determinaram-se as velocidades de propagação  $V$ , em km/s, através da seguinte expressão:

$$V = L / t$$

Em que:

$L$  – é o comprimento de percurso, em mm;

$t$  – é o tempo de percurso registado pelo equipamento, em  $\mu$ s.

### 6.2.3. Determinação do Módulo de elasticidade

Após a determinação da velocidade de propagação de ultra-sons procedeu-se á estimativa dos módulos de elasticidade do betão, efectuando-se para isso iterações entre os valores presentes na tabela seguinte, conforme indicado no manual técnico do teste de medição de ultra-sons.

Figura 6.5. Relação empírica entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático e a velocidade de propagação de ultra-sons (BS 1881: Part 203: 1986)

Velocidade dos ultra-sons (V), em [km / s]	Módulo de elasticidade	
	Dinâmico (Ed) [MN / m <sup>2</sup> ]	Estático (Es) [MN / m <sup>2</sup> ]
3,6	24 000	13 000
3,8	26 000	15 000
4,0	29 000	18 000
4,2	32 000	22 000
4,4	36 000	27 000
4,6	42 000	34 000
4,8	49 000	43 000
5,0	58 000	52 000

### **6.3. Ensaio de resistência à compressão**

Coutinho (1994) refere que “Para se conhecer a resistência de um material é necessário explicar o que se entende pelo fenómeno de rotura, o que se torna extremamente difícil pois não há uma definição perfeitamente geral.”

O fenómeno da rotura pode ser interpretado segundo três aspectos, como sendo a separação de um sólido contínuo em dois ou mais pedaços distintos, como a carga máxima que uma peça solicitada de maneira geometricamente fixa suporta ou ainda como o estado de deformação ou fissuração de tal forma excessivo que o material já não seja utilizável (Coutinho, 1994).

O valor da rotura é convencional, uma vez que este estado limite é influenciado pela forma como é atingido. Na realização dos ensaios de compressão existe sempre uma série de aspectos, uns estranhos ao fenómeno de rotura (forma do provete, idade, tensões iniciais, etc.) outros inerentes ao fenómeno (dimensão dos provetes, velocidade de aplicação das cargas, etc.) que afectam o seu valor, tornando praticamente impossível o conhecimento do seu valor exacto (Coutinho, 1994).

Para conhecer a resistência à compressão das diferentes composições e em diferentes idades foram realizados ensaios de compressão em 9 provetes de cada uma das distintas composições (M0, M1 e M2) em todas as idades em estudo, ou seja, aos 28, 90 e 180 dias.

#### **6.3.1. Procedimento de ensaio**

Os ensaios de compressão realizados no presente trabalho foram executados seguindo a norma NP EN 12390-3 (2009), tendo sido realizados na prensa uniaxial da marca FORM+TEST, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, com uma célula de carga de 3.000KN (figura 6.6.).



Figura 6.6. Prensa utilizada no ensaio de compressão dos provetes

Como os provetes em estudo eram de  $100 \times 100 \times 100$  [mm<sup>3</sup>], sendo estas dimensões inferiores às normalizadas pela prensa, colocaram-se dois pratos auxiliares entre os provetes e os pratos da prensa tendo se tipo especial cuidado na sua colocação para que estes ficassem centrados. Antes da colocação dos provetes na prensa procedeu-se á limpeza quer dos pratos auxiliares quer dos provetes, tendo os provetes sido colocados para que as faces em contacto com a prensa fossem o mais planas e perfeitas possível.

Relativamente á aplicação de carga do provete, esta foi feita por controlo manual da velocidade de descida do prato da prensa, como a norma nos indica no caso de provetes de tensão de rotura baixa a velocidade de aplicação da carga deve estar compreendida dentre os 0,2 MPa/s e os 1,0 MPa/s tentou-se manter uma velocidade constante de 0,6 MPa/s. O culminar do ensaio dá-se com a rotura dos provetes.

### 6.3.2. Modo de Rotura dos provetes

Os modos de rotura por compressão geralmente verificados nos ensaios realizados em laboratório, são geralmente de dois tipos distintos: rotura devido ao atrito entre a placa através

da qual se aplica a compressão e o topo do espécime de ensaio e a rotura por arranque ou descoesão. Verifica-se ainda com alguma frequência uma rotura em plano inclinado relativamente à força de compressão, aparentemente por corte, originado pela falta de planura das faces de compressão (Coutinho,1994).

Nos ensaios de compressão onde existe atrito entre a superfície do provete e os pratos da prensa, o provete durante o ensaio é sujeito a um sistema de forças que não é unidireccional, originado pela complexidade do que acontece na zona de aplicação das forças pela máquina, resultante da restrição à expansão lateral sob a carga. Existe sempre uma deformação transversal associada à tensão de compressão actuante. Os elementos do provete próximos da superfície de contacto encontram-se sujeitos a um estado triplo de tensões, originado pela tensão de compressão e pelas tensões resultantes das forças de atrito que actuam nos pratos. Os pontos de tensão sujeitos a este estado triplo de tensões possuem uma maior resistência comparativamente aos que se encontram a maior distância dos pratos (Coutinho,1994).

Quando o efeito da resistência à deformação lateral imposta pelos pratos da máquina é importante, então tudo se passa como se o volume influenciado por essas faces laterais que impedem a dilatação dos topos do prisma esteja impedido de se deformar. Ora esse volume é praticamente uma pirâmide com base no topo do prisma e vértice a uma distância sensivelmente igual à maior dimensão da base (ver figura 6.7.) (Coutinho, 1994).

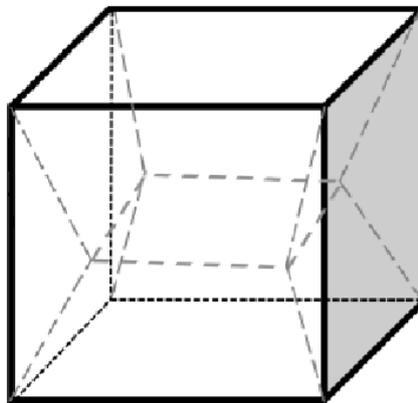


Figura 6.7. Esquema do de rotura atingido quando o atrito do prato da prensa impede a deformação transversal da secção de aplicação das forças de compressão

A norma portuguesa NP EN 12390-3 quais os modos de rotura aceitáveis, ou seja, aqueles a que corresponde uma boa resistência á compressão. Assim, nesta norma diferenciam-se as roturas satisfatórias (ver figura 6.8.) das roturas não satisfatórias (ver figura 6.9.).

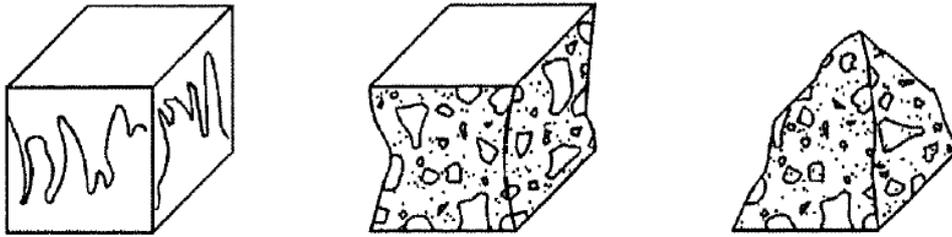


Figura 6.8. Modos rotura satisfatórios para provetes cúbicos de acordo com a norma portuguesa NP EN 12390-3

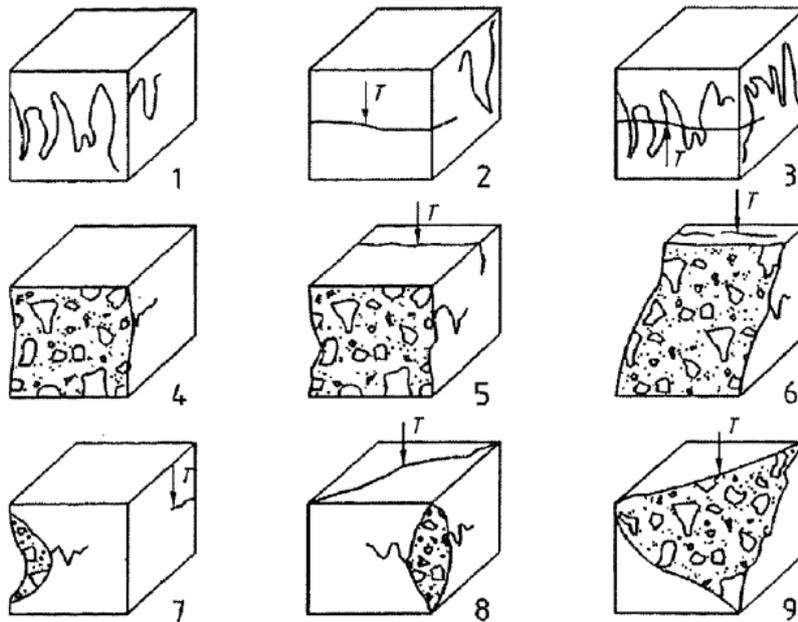


Figura 6.9. Modos rotura não satisfatórios para provetes cúbicos de acordo com a norma portuguesa NP EN 12390-3

## 6.4. Ensaio de carbonatação

Os provetes foram submetidos ao teste com o indicador fenoltaleína após a rotura provocada pelo ensaio de compressão. Foram testados três provetes de cada série de provetes ensaiados á compressão.

### 6.4.1. Procedimento de ensaio

Após rotura dos provetes causada pelo ensaio de compressão, foi retirada parte envolvente de betão que se encontrava fissurada e foi aspergida solução de fenoltaleína na

amostra registando-se a cor apresentada pela amostra e conseqüentemente a profundidade de carbonatação(ver figura 6.10.).



Figura 6.10. Provete sujeito a ensaio de carbonatação posteriormente a ser fraturado pelo ensaio de compressão

#### **6.4.2. Fenolftaleína como indicador do nível de carbonatação**

Como a carbonatação resulta numa diminuição do pH, a fenolftaleína como se apresenta incolor em soluções ácidas e assume a cor rosa em soluções básicas, dando-se a mudança de cor entre valores de pH de 8,2 e 9,8, permitindo medir o nível de carbonatação pois em zonas em que se desenvolveu o fenómeno de carbonatação a fenolftaleína mantém-se incolor.

### **6.5. Ensaio de resistência à penetração por cloretos**

Relativamente à resistência à penetração por cloretos, foram sujeitos a ensaio provetes referentes a cada uma das misturas em estudo, após 28 e 180 dias de cura em câmara húmida a 95% de humidade relativa.

#### **6.5.1. Preparação para ensaio**

Antes de se iniciar o ensaio foi necessário proceder à preparação dos provetes, tendo-se para isso procedido ao revestimento de quatro faces dos provetes cúbicos através da aplicação Poxitar F em quatro faces adjacentes, deixando-se duas faces opostas sem isolamento. O

processo de revestimento foi repetido ao após 24h, tendo-se deixado secar outras 24h antes de mergulhar os provetes na água do mar sintética (figura 6.11.).



Figura 6.11. Isolamento dos provetes com Poxitar F, para posterior ensaio á penetração de cloretos

Procedeu-se ainda nesta fase de preparação à produção de água do mar sintética com a seguinte composição química: 30 g/l de NaCl, 6 g/l de MgCl<sub>2</sub>, 5g/l de MgSO<sub>4</sub>, 1,5 g/l de CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O e 0,2 g/l de KHCO<sub>3</sub>. Produziu-se 50 l de água de mar sintética para que a quantidade fosse suficiente para que todos os provetes ficassem submersos.

### 6.5.2. Procedimento de ensaio

Os ensaios de avaliação da resistência à penetração de iões cloreto realizados no presente trabalho foram executados com base no procedimento descrito na publicação “Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC-PFA-MK binder compositions exposed to synthetic seawater” dos autores Bai et al. (2003).

Após o revestimento dos provetes e preparação de água do mar sintética conforme descrito no ponto acima os provetes foram colocados na água do mar sintética, e procedeu-se ao isolamento do recipiente através da aplicação de película aderente. Os provetes foram mantidos submersos durante 28 dias, após os quais foram retirados da água do mar sintética.

Posteriormente a serem retirados da água do mar sintética os provetes foram colocados em estufa durante, durante 72 horas. Após este período procedeu-se ao corte dos provetes, tendo sido cortadas 3 fatias de 1cm cada de um dos lados do provete, pois não foi possível extrair fatias de menor espessura com a serra disponível no laboratório. Após extraídas as fatias e tendo estas sido devidamente identificadas, procedeu-se á moagem da zona central destes com o auxílio de um almofariz e pilão, com o intuito de reduzir as partículas a uma dimensão inferior a 0,150 mm.

A amostra foi colocada num peneiro de 150  $\mu\text{m}$  e levada a peneirar na mesa de peneiração durante 10 minutos, após os quais o material passado foi colocado num recipiente e identificado e o material retido foi colocado novamente no almofariz e submetido a nova moagem sendo levado novamente a peneiração, este processo foi repetido até que todo o material passasse no peneiro de 150  $\mu\text{m}$ .

Após recolhidas as amostras conforme descrito anteriormente, foram utilizadas 5 g correspondentes a cada fatia em análise, esses 5g foram dissolvidos em 100 ml de solução de 10% de  $\text{HNO}_3$  (ácido nítrico), tendo-se tido o cuidado de adicionar a solução em pequenas quantidades forma a controlar a reacção. Posteriormente, esta dissolução da amostra na diluição de ácido nítrico foi levada à ebulição numa placa de aquecimento, tendo-se registado 10 minutos após o inicio do processo de ebulição, seguidamente reduziu-se a intensidade da placa de aquecimento e deixou-se a dissolução na placa de aquecimento durante mais 15 minutos, após os quais se retirou da placa e deixou arrefecer. Posteriormente procedeu-se á diluição da dissolução acima referenciada para um balão volumétrico de 500ml, adicionando-se água destilada quente pois esta propicia a migração dos iões cloreto (Figura 6.12.).



Figura 6.12. Processo de diluição

Da diluição anterior foi retirada uma amostra de 50ml, a esta amostra foram adicionados 2 ml de ISA, realizando-se o ensaio de adição padrão de seguida. Através de ensaios de recuperação verificou-se que as amostras possuíam interferentes, sendo então o método de adição padrão o mais indicado. Na realização do ensaio de adição padrão a solução padrão adicionada detinha uma concentração de iões cloreto de 1000 mg/l.

De notar que após realizar o ensaio de adição padrão anterior resultados atingidos para algumas amostras, relativos à concentração iões cloretos da amostra eram muito baixos, tendo-se repetido o ensaio com uma maior massa inicial de amostra e/ou reduzindo o volume da diluição.



## **7. Caracterização do comportamento do betão de cal hidráulica aditivado com metacaulino**

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos através da execução dos ensaios descritos no capítulo anterior com o intuito de se proceder á caracterização do comportamento do betão em estudo.

---

## 7.1. Trabalhabilidade do betão

O estudo do comportamento do betão enquanto fresco consistiu na análise da sua trabalhabilidade, esta característica foi avaliada através da realização de ensaios de abaixamento (slump test), tendo os ensaios sido realizados de acordo com o descrito no capítulo anterior.

As composições de betão realizadas apresentaram uma baixa trabalhabilidade, tendo a mesma composição de betão apresentado pouca variabilidade de valores de abaixamento nas diferentes produções de betão realizadas.

As diferentes composições de betão realizadas nomeadamente M0, M1 e M2 apresentaram como valores médios de abaixamento do cone de Abrams respectivamente 0,7 cm, 1 cm e 0,97cm. Estes baixos valores de abaixamento permitem classificar todas as composições como classe S1 de acordo com a norma NP EN 206-1:2007.

## 7.2. Módulo de elasticidade do betão

No gráfico da figura seguinte encontram-se representados os valores de módulo de elasticidade dinâmico das diferentes composições de betão nas idades em estudo, ou seja, aos 28, 90 e 180 dias. Estes resultados permitem avaliar a evolução do módulo de elasticidade dinâmico do betão com a idade bem como analisar o efeito da substituição parcial de cal hidráulica por metacaulino no módulo de elasticidade dinâmico evidenciado pelo betão, comparando para isso o desenvolvimento do módulo de elasticidade nas três composições distintas (M0, M1 e M2).

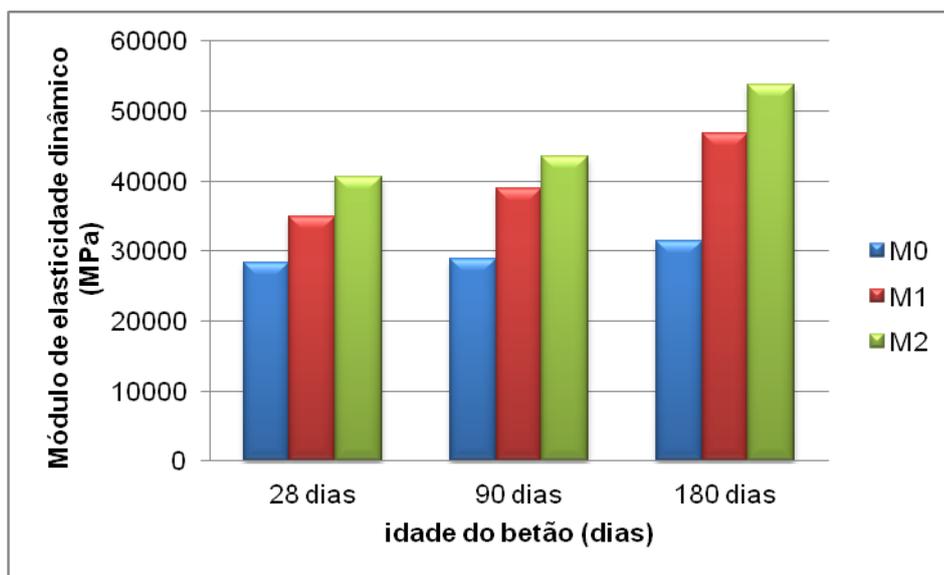


Figura 7.1. Resultados do módulo de elasticidade médios das composições M0, M1 e M2 nas idades em estudo (28, 90, 180 dias)

Pela análise do gráfico da figura anterior pode verificar-se que, como seria de esperar, os provetes com substituição de cal hidráulica por 20% de metacaulino (M2), apresentam os melhores resultados para todas as idades em estudo.

Torna-se ainda evidente o benefício da incorporação de metacaulino na evolução do módulo de elasticidade com a idade do betão, uma vez que, as misturas M1 e M2 apresentam aos 180 dias um valor de módulo de elasticidade muito superior ao evidenciado por estas mesmas composições aos 28 dias. Analisando a evolução do módulo de elasticidade da composição M1, esta possui aos 180 dias um módulo de elasticidade médio de 46888 MPa enquanto que aos 28 dias este valor é de 34927 MPa o que confere uma diferença no módulo de elasticidade entre estas idades de 11961 MPa. A composição M2 apresenta um valor na mesma ordem de grandeza do evidenciado pela M1, apresentando uma diferença de módulo de elasticidade entre os 28 e os 180 dias de 13110 MPa. No entanto, a composição M0 apenas apresenta uma diferença de 3116 MPa entre estas idades, ou seja, o acréscimo do módulo de elasticidade na composição sem metacaulino é bastante menor comparativamente ao demonstrado pelas composições com metacaulino, sendo cerca de 26% do valor de acréscimo evidenciado pela composição M1 e aproximadamente 24% do verificado pela M2.

A substituição parcial de cal hidráulica por metacaulino apresenta benefícios consideráveis relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico, evidenciando-se esses benefícios logo aos 28 dias de idade de betão, como podemos verificar no gráfico anterior aos 28 dias de idade a diferença entre a composição M2 e a M0 é de 12223 MPa, esta diferença sofre ainda uma subida considerável com a evolução das composições no tempo, sendo que

aos 90 dias é de 14548 MPa e aos 180 dias é de 22217 MPa. Assim a composição M2 apresenta valores superiores aos verificados pela composição M0 em cerca de 43% aos 28 dias, 50% aos 90 dias e aproximadamente 70 % aos 180 dias.

O gráfico da figura 7.2. apresenta a evolução do módulo de elasticidade dinâmico em função do tempo de cura do betão para as três composições distintas.

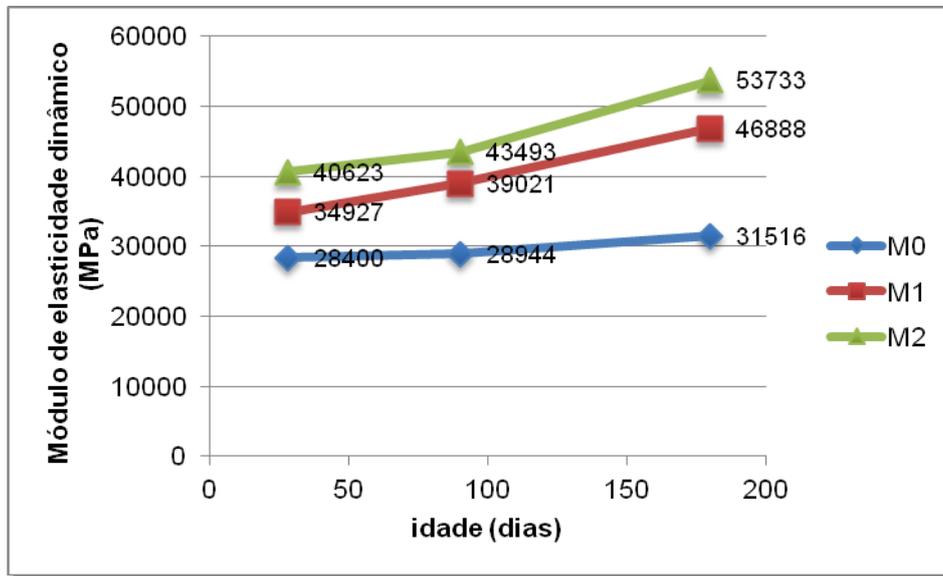


Figura 7.2. Evolução do módulo de elasticidade das diferentes composições com a idade do betão

Através da análise do gráfico presente na figura anterior torna-se ainda mais evidente o acréscimo do módulo de elasticidade dinâmico com a idade do betão denotando-se que dos 90 aos 180 dias este acréscimo é mais notório, como se pode verificar este troço do gráfico apresenta um maior declive comparativamente ao troço anterior.

## 7.3. Resistência à compressão

Os ensaios de resistência á compressão foram realizados como descrito no capítulo anterior para todas as composições em estudo nas idades de 28, 90 e180 dias.

### 7.3.1. Análise visual dos provetes sujeitos ao ensaio de compressão

Nas fotografias presentes nas figuras 7.3 e 7.4 encontram-se representados os modos de rotura evidenciados pelos provetes sujeitos ao ensaio de compressão.



Figura 7.3. Modo de rotura evidenciado pelos provetes cúbicos durante o ensaio de compressão



Figura 7.4. Modo de rotura evidenciado pelos provetes cúbicos após ensaio de compressão

Todos os provetes sujeitos a ensaio de compressão revelaram a mesma forma de rotura, que como podemos visualizar na figura anterior ocorre com a formação de um prisma, podemos concluir que esta se encontra de acordo com a rotura satisfatória estipulada pela norma portuguesa NP EN 12390-3 (2009).

### 7.3.2. Análise dos resultados do ensaio de resistência de compressão

O gráfico da figura seguinte apresenta os resultados obtidos através dos ensaios de resistência de compressão das três composições em estudo aos 28, 90 e 180 dias. A análise destes resultados permite avaliar a evolução da resistência de compressão dos provetes com a idade do betão bem como analisar a influência da substituição parcial de cal hidráulica por metacaulino nos valores de resistência de compressão evidenciados pelos provetes, ou seja, comparar os resultados obtidos pelas diferentes composições em estudo nas idades em estudo.

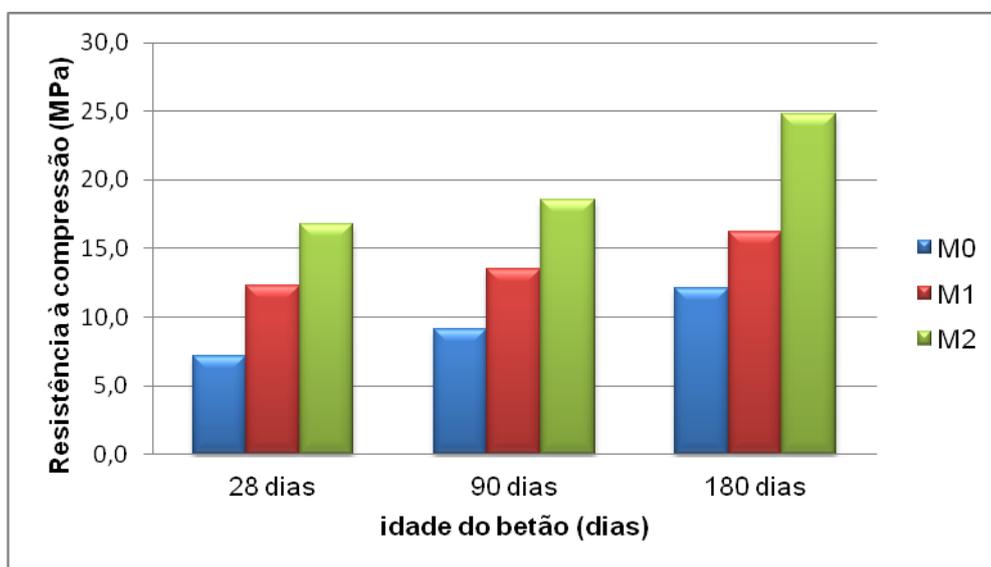


Figura 7.5. Resultados de resistência à compressão simples média das composições M0, M1 e M2 nas idades de 28, 90 e 180 dias

Como seria de esperar os valores de resistência de compressão obtidos pela composição M2, ou seja, pela composição com a percentagem de metacaulino mais elevada apresentam melhores resultados em todas as idades em estudo, apresentando a composição M1 melhorias também relativamente ao registado pela composição M0. Como podemos verificar logo aos 28 dias o valor médio de resistência à compressão atingido pela composição M2 é de

16,8 MPa valor este, muito superior ao registado pela composição M0, apresentando esta apenas uma resistência de compressão de 7,1 MPa, assim, já logo aos 28 dias o valor de resistência à compressão verificado pela composição M2 é cerca de 137% superior ao evidenciado pela M0.

A composição M1 apresenta aos 28 dias uma resistência média de 12,3 MPa, registando assim um valor superior ao evidenciado pela composição M0 em aproximadamente 73%, e inferior ao registado pela M2, sendo o valor médio de resistência de compressão observado para a composição M2 cerca de 37% superior ao registado para a composição M1.

A melhoria de resistência de compressão com a adição de metacaulino verifica-se para as outras idades em estudo, apresentando a M2 um valor superior ao evidenciado pela M0 em cerca de 103% e 105%, respectivamente, nas idades de 90 e 180 dias. Analogamente comparando as composições M1 e M2 verificamos que a melhoria de resistência verificada pela composição M2 relativamente á composição M1 tende a aumentar com a idade visto que M2 apresenta valores superiores aos verificados para a composição M1 em aproximadamente 37% e 53%, respectivamente aos 90 e aos 180 dias.

Pela análise do gráfico da figura 7.6. torna-se clara a melhoria da resistência á compressão do betão com a sua evolução no tempo para todas as composições em estudo.

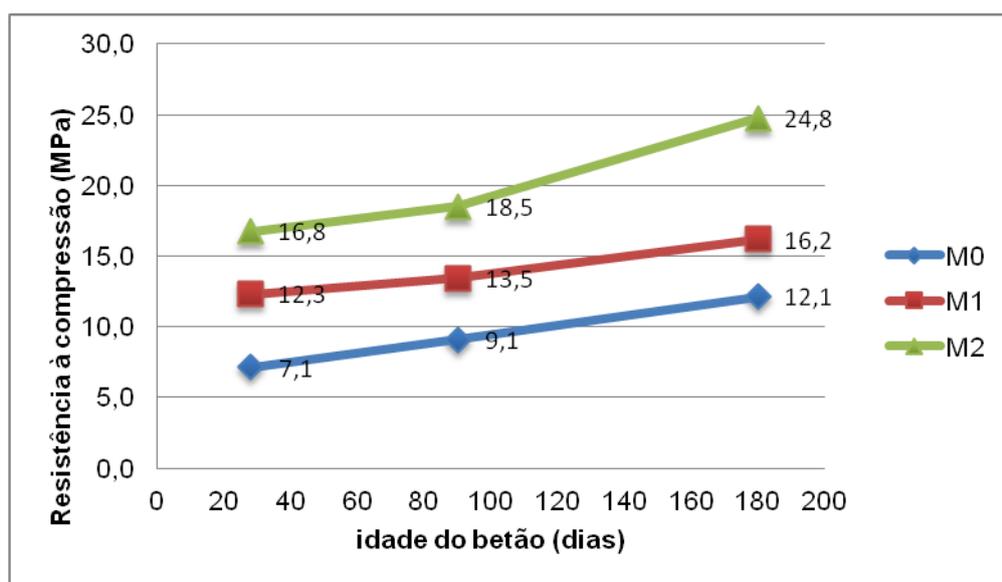


Figura 7.6. Evolução da resistência à compressão das diferentes composições ao longo do tempo

Como podemos verificar pelo gráfico anterior o acréscimo da resistência de compressão com a idade do betão dos 90 aos 180 dias é mais acentuado, uma vez que se apresenta um declive superior neste troço de gráfico do que no anterior.

Os gráficos presentes nas figuras seguintes apresentam as variações existentes entre os valores de resistência à compressão em função da massa dos provetes aos 28, 90 e 180 dias.

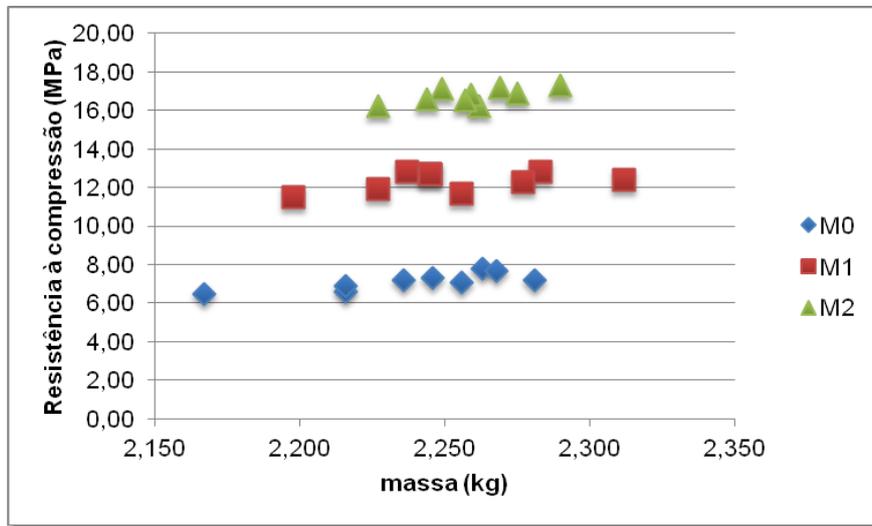


Figura 7.7. Relação entre a resistência de compressão e a massa dos provetes das diferentes composições aos 28 dias de idade.

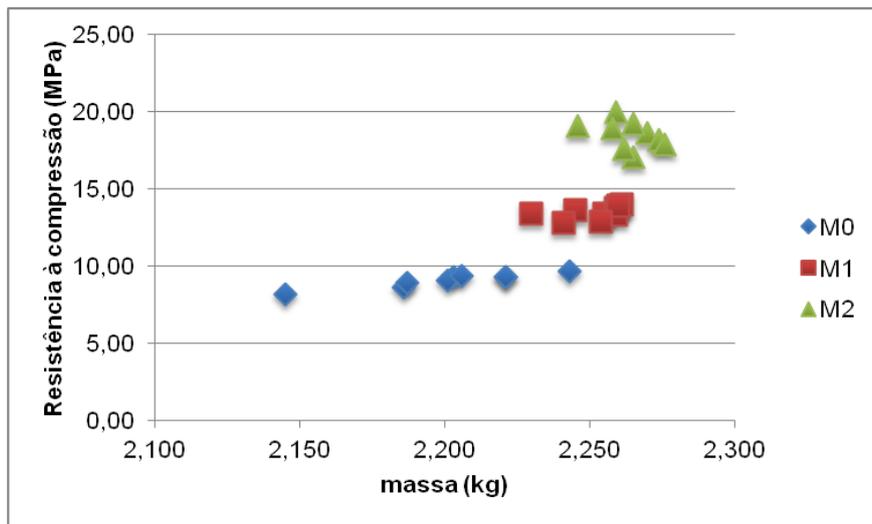


Figura 7.8. Relação entre a resistência de compressão e a massa dos provetes das diferentes composições aos 90 dias de idade.

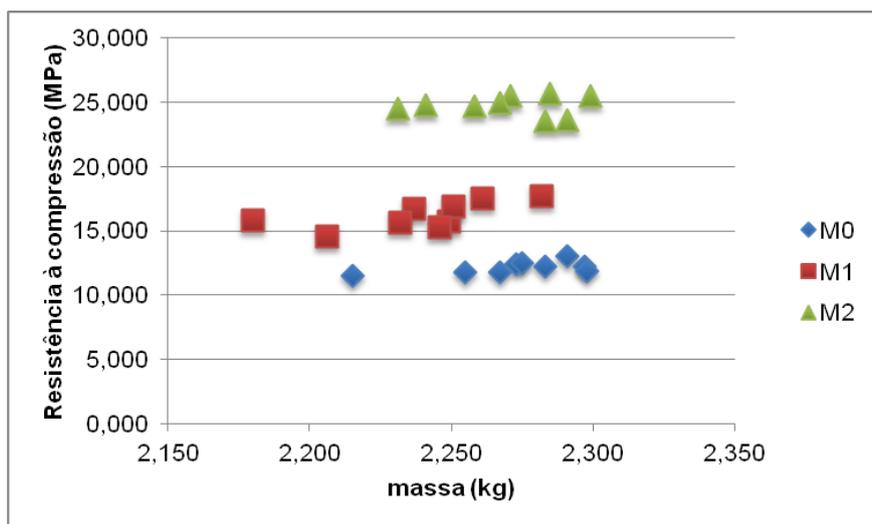


Figura 7.9. Relação entre a resistência de compressão e a massa dos provetes das diferentes composições aos 180 dias de idade.

Como se pode verificar pela análise das figuras 7.7., 7.8. e 7.9. os resultados obtidos apresentam uma dispersão considerável, não permitindo relacionar a composição de betão com a massa dos provetes. No entanto, analisando os valores médios da massa dos provetes presentes nas tabelas III do apêndice III verifica-se que as composições com adição de metacaulino apresentam valores médios de massa mais elevados do que os provetes sem adição metacaulino. Os provetes efectuados a partir da composição M2 possuem um valor médio de massa de mais elevado comparativamente com os provenientes da composição M1. Assim, através destes resultados podemos aferir que existe uma tendência para um aumento da massa dos provetes com a adição de metacaulino á composição, devido à finura do material metacaulino, que permite a elaboração de betões mais compactos. Para além da reacção pozolânica, este aumento de compacidade também contribui para o acréscimo de resistência mecânica.

As tabelas com os resultados obtidos de resistência à compressão com respectivas médias e desvio-padrão (tabelas III) são apresentadas no Apêndice III. Pela análise destas tabelas verificamos alguma dispersão nos valores de resistência de compressão registados, no entanto os resultados obtidos são considerados representativos uma vez que o desvio-padrão máximo atingido foi de 0,89 MPa, valor este inferior a 1,5 MPa como estipulado pela classificação padrão de controlo dos betões com resistências até 35MPa conforme indicado pelo ACI 214-77.

## 7.4. Carbonatação do betão

O estudo relativo ao nível de carbonatação existente nos provetes de betão foi executado conforme descrito no capítulo anterior após a execução do ensaio de compressão. Nas figuras seguintes são apresentadas fotografias do ensaio em provetes das diferentes composições.



Figura 7.10. Provede de composição M0 aos 180 dias de idade sujeito ao ensaio de fenolftaleína após ensaio de compressão.



Figura 7.11. Provede de composição M1 aos 180 dias de idade sujeito ao ensaio de fenolftaleína após ensaio de compressão.



Figura 7.12. Provete de composição M2 aos 180 dias de idade sujeito ao ensaio de fenolftaleína após ensaio de compressão.

Analisando as fotografias referentes às composições M0, M1 e M2 aos 180 dias podemos verificar que nenhuma das composições apresenta vestígios de carbonatação nas zonas de fractura, apenas numa zona superficial dos provetes se verificou que a fenolftaleína se manteve incolor, tendo essa zona uma profundidade máxima de 3,0 mm a 5,0 mm.

## 7.5. Resistência à penetração de cloretos

Nos gráficos das figuras 7.13. e 7.14., são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios de resistência à penetração de íões cloreto realizados para as três composições de betão em estudo no presente trabalho, tendo-se realizado o ensaio em provetes com 28 dias de cura e 180 dias de cura em câmara húmida a humidade relativa de 95%. Através da análise destes resultados podemos avaliar a influência da substituição parcial de cal hidráulica por metacaulino na permeabilidade do betão aos íões cloreto bem como analisar a influência da idade a que o betão é sujeito à água do mar sintética na permeabilidade evidenciada.

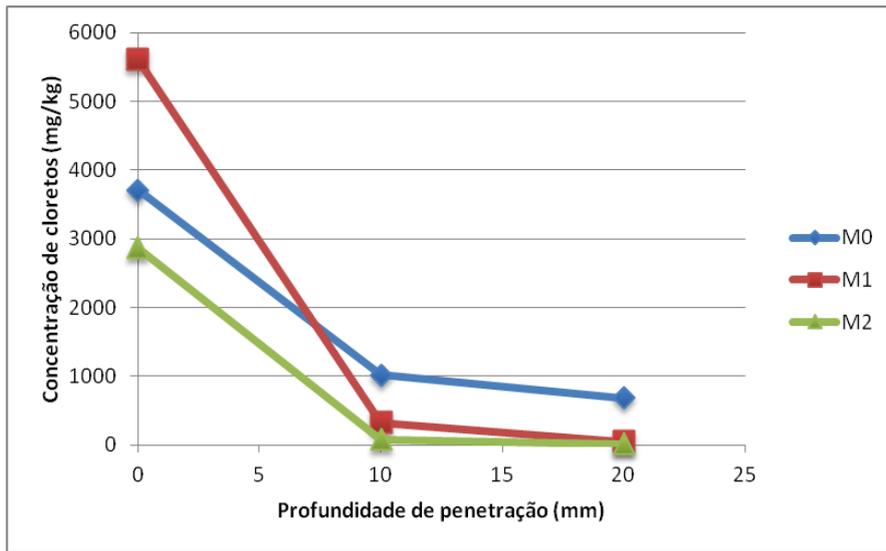


Figura 7.13. Penetração de íons cloreto em profundidade para as diferentes misturas evidenciadas pelos provetes com 28 dias de cura em câmara húmida.

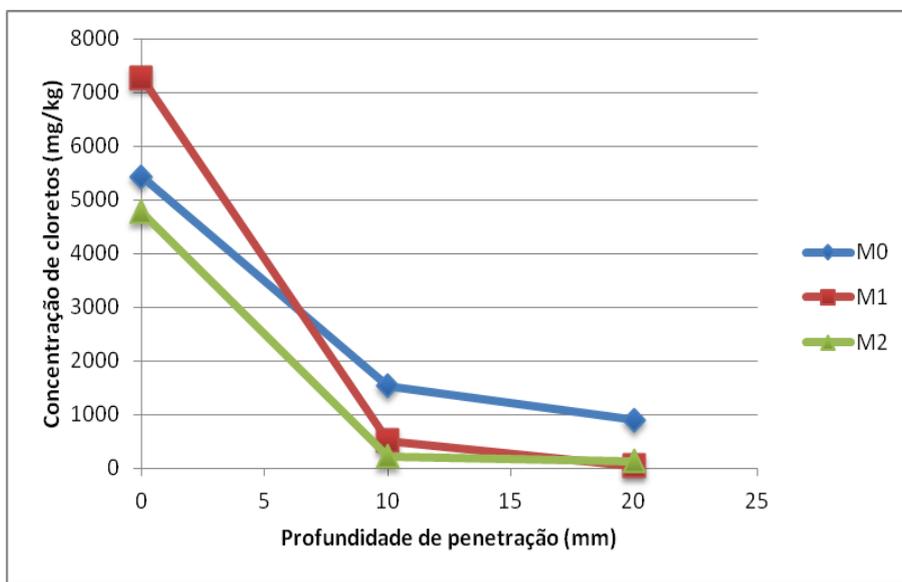


Figura 7.14. Penetração de íons cloreto em profundidade para as diferentes misturas evidenciadas pelos provetes com 28 dias de cura em câmara húmida.

Como seria de esperar a composição M2, cuja percentagem de substituição parcial de cal hidráulica por metacaulino é de 20%, apresenta os melhores resultados relativamente à resistência à penetração dos íons cloreto para ambas as idades do betão em estudo. A melhoria em relação à resistência à penetração de íons cloreto por esta composição é logo evidente na fatia superficial, apresentando esta a composição M2 uma concentração de 2871 mg/kg e de 4779 mg/kg, respectivamente nos provetes com 28 e 180 dias de cura em câmara húmida. A composição M2, aos 28 dias apresenta uma diminuição da concentração de íons cloreto na

camada superficial de cerca de 23% em relação à evidenciada pela composição M0 e de aproximadamente 49% em relação à apresentada pela composição M1. Esta tendência mantém-se nos provetes com 180 dias de cura, no entanto esta diminuição é mais subtil, apresentando a composição M2 uma diminuição de concentração de iões cloreto de aproximadamente 12% relativamente à composição M0 e de cerca de 34 % em relação à composição M1. De notar que a adição de 10% de metacaulino leva a um aumento na concentração de iões cloreto na camada superficial.

Em profundidade a composição M1 apresenta menores concentrações de iões cloreto do que as evidenciadas pela composição M0, sendo estas superiores às presentes na composição M2, com excepção do verificado na terceira camada dos provetes com 180 dias de cura pois neste caso a composição M1 apresenta menor concentração de iões cloreto. A composição M1 apresenta na segunda fatia dos provetes com 28 dias de cura em câmara húmida uma concentração de iões cloreto de 323 mg/kg, apresentando as composições M0 e M2 para a mesma camada valores de concentração de respectivamente, 1019 mg/kg e 82 mg/kg. A composição M1 apresenta assim uma diminuição da concentração de iões cloreto de aproximadamente 68% comparativamente à existente na composição M0, sendo superior à existente na composição M2 em cerca de 75%. Nos provetes com 180 dias de cura a composição M1 apresenta na camada acima referenciada uma concentração de iões cloreto de 509 mg/kg, sendo esta concentração menor que a presente na composição M0 em cerca de 67% e superior à evidenciada pela composição M2 em cerca de 55%.

Em relação aos provetes com 28 dias de cura em câmara húmida, para profundidades superiores aos 20 mm a concentração de iões cloreto da composição M1 aproxima-se da evidenciada pela composição M2, apresentando a composição M1 concentração de iões cloreto de 50 mg/kg e a composição M2 uma concentração de 15 mg/kg. A composição M0 apresenta para a terceira camada analisada um valor de concentração de iões cloreto superior ao presente na composição M1 de aproximadamente 93% e de cerca de 98% relativamente ao registado para a composição M2. Os provetes com 180 dias de cura em câmara húmida apresentam para a composição M1 uma concentração aproximada à presente nos provetes com 28 dias de cura, no entanto, as outras duas composições apresentam um aumento da concentração de iões cloretos, indo de encontro ao já evidenciado pelas camadas anteriores. A composição M1 apresenta na terceira fatia em estudo melhores resultados que as restantes, apresentando uma concentração de 50 mg/kg, sendo esta concentração inferior às existentes nas composições M0 e M2 em aproximadamente 94% e 62%, respectivamente.

Pela análise dos gráficos presentes nas figuras seguintes torna-se clara a influência do tempo de cura do betão na câmara húmida relativamente à permeabilidade do betão aos iões cloreto.

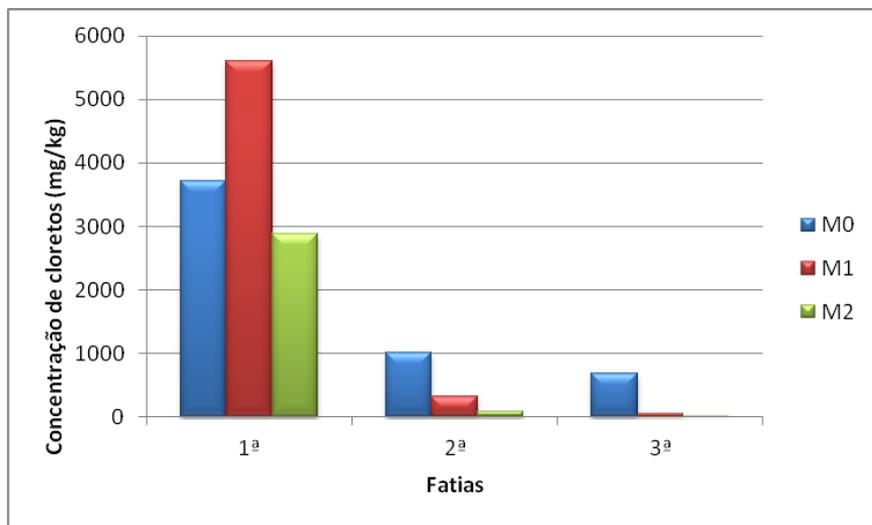


Figura 7.15. Gráfico de comparação dos valores de concentração em iões cloreto existentes nas camadas analisadas para as distintas misturas, nos provetes com 28 dias de cura

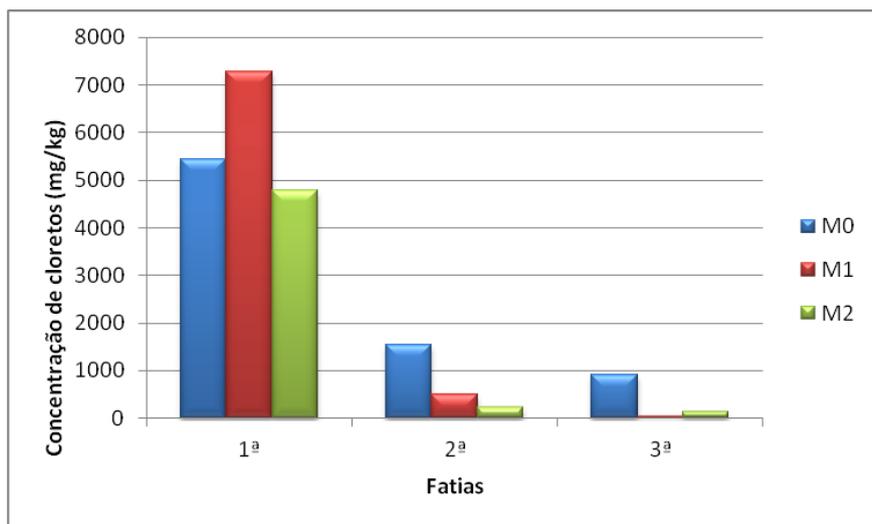


Figura 7.16. Gráfico de comparação dos valores de concentração em iões cloreto existentes nas camadas analisadas para as distintas misturas, nos provetes com 180 dias de cura

Os provetes com 180 dias de cura em câmara húmida apresentam sempre valores de concentração de iões cloreto superiores aos evidenciados pelos provetes com 28 dias de cura, com excepção dos valores apresentados pela composição M1 a profundidades superiores aos 20 mm, em que a concentração de iões cloreto registada é semelhante, independentemente do tempo de cura. De notar que nos provetes com 180 dias de cura a composição M2 apresenta na terceira camada valores de concentração de iões cloreto superiores aos verificados pela composição M1, tendência inversa à que se verifica na mesma camada dos provetes com 28 dias de cura.

De notar que a margem de erro inerente aos valores obtidos de concentração de iões cloreto é maior para valores de concentração de iões cloreto por litro de diluição baixos. Apesar da tentativa de aumentar esta concentração pela repetição do ensaio com maiores concentrações alguns valores apresentados são relativamente baixos, logo apresentam uma margem de erro maior (Ver tabelas IV.2. e IV.3. do apêndice IV).

## **7.6. Discussão dos resultados obtidos**

Na sua generalidade os resultados obtidos através dos ensaios realizados vão de encontro aos esperados para as composições em estudo, reflectindo o efeito benéfico na adição de metacaulino para aumentar a viabilidade de utilização do betão de cal hidráulica.

Como foi referido no capítulo anterior o betão produzido possuía trabalhabilidade reduzida apesar da incorporação de superplastificante. Para esta baixa trabalhabilidade pode ter contribuído a forma do agregado uma vez que as partículas da brita apresentavam uma forma cúbica britada, ou seja, detinham faces planas e arestas vivas. Esta forma de partículas leva a que o ângulo de atrito interno do betão seja mais elevado o que contribui para uma menor trabalhabilidade do betão e pior arranjo das partículas, o que leva a uma baixa compacidade do betão.

Relativamente aos resultados obtidos de módulo de elasticidade dinâmico, estes vão de encontro ao esperado, uma vez que o módulo de elasticidade de uma mesma composição aumenta com o seu tempo de cura do betão e quando comparamos os resultados obtidos para as diferentes composições de betão os valores de módulo de elasticidade aumentam com a adição de metacaulino, apresentando a composição com substituição parcial de 20% de cal hidráulica por metacaulino os melhores resultados de módulo de elasticidade dinâmico.

Os ensaios de medição da velocidade de propagação de ultra-sons, não nos permitem ter uma estimativa correcta da resistência de compressão dos provetes entre as diferentes composições uma vez que ao realizar os ensaios de compressão verificaram-se valores próximos de compressão entre as composições M0 aos 180 dias e M1 aos 28 dias bem como entre a composição M1 aos 180 dias e a M2 aos 28 dias, no entanto a velocidade de propagação de ultra-sons média entre estas é bastante distinta.

Apesar dos resultados obtidos relativos à resistência de compressão serem próximos dos evidenciados pelo estudo já referido nesta dissertação relativo ao comportamento do betão de cal hidráulica com metacaulino português os valores alcançados são ligeiramente menores do que os evidenciados nesse estudo. No entanto, os valores de resistência à compressão verificados neste trabalho são coerentes com o esperado relativamente à evolução da resistência de compressão entre os 28 dias e os 90 dias evidenciados pelo estudo acima referido.

Como esperado a composição com substituição parcial da cal hidráulica por 20% de metacaulino apresenta os melhores resultados de resistência á compressão em todas as idades em estudo, aumentando essa melhoria com a evolução das composições no tempo.

Relativamente ao nível de carbonatação evidenciado pelos provetes, tendo em consideração que foram conservados em câmara húmida com 95% de humidade relativa, todas as composições apresentaram um nível de carbonatação muito reduzido, apenas se verificou carbonatação a um nível superficial.

Também relativamente à resistência à penetração de iões de cloreto a composição M2, ou seja, a adição de 20% de metacaulino tem como consequência uma diminuição da permeabilidade do betão superior à evidenciada pelas restantes composições. A adição de metacaulino em 20% apresenta logo na camada superficial benefícios significativos relativamente à resistência de penetração de cloretos. Contrariamente ao evidenciado pela composição M2, a adição de 10% de metacaulino resulta num aumento da concentração de iões cloreto na camada superficial comparativamente á composição sem adição de metacaulino, este aumento pode resultar da reacção química do metacaulino com os iões cloreto sendo produzido Sal de Friedel.

Apesar da adição de 10% de metacaulino ter como consequência um aumento da concentração de iões na camada superficial, em profundidade esta adição é benéfica para a melhoria da resistência à penetração do betão. A adição de metacaulino ao betão resultou numa melhoria da resistência à penetração de iões cloreto em profundidade.



## **8. Conclusões e perspectivas futuras**

Neste último capítulo procede-se á descrição das principais conclusões do trabalho realizado, com o intuito de se caracterizar o comportamento do betão de cal hidráulica aditivado com metacaulino português. Referem-se ainda algumas perspectivas para trabalhos futuros.

---

## 8.1. Principais conclusões

Nesta secção procede-se então á caracterização do comportamento do betão de cal hidráulica aditivado de metacaulino português, como era objectivo do trabalho.

Relativamente ao comportamento do betão enquanto fresco, todas as amassaduras realizadas das diferentes composições em estudo apresentaram uma trabalhabilidade reduzida, apesar da incorporação de superplastificante.

Os provetes de betão das diferentes composições de betão analisadas no presente trabalho apresentam valores crescentes de módulo de elasticidade dinâmico com a idade, registando a composição com substituição parcial de 20% da cal hidráulica por metacaulino os valores mais elevados.

Analisando a variação da tensão de rotura à compressão das diferentes composições com a idade do betão verifica-se que os valores de resistência à compressão aumentam com a idade do betão em todas as composições em estudo, indo de encontro ao também verificado pelo modulo de elasticidade dinâmico. O metacaulino influencia positivamente a resistência à compressão dos provetes de betão em todas as idades, apresentando assim a mistura M0 os valores de resistência mais baixos e a M2 os valores mais elevados para qualquer idade em estudo de betão.

Os valores de resistência à compressão atingidos para o betão com substituição de cal hidráulica em 20% por metacaulino são bastante superiores comparativamente aos evidenciados pelo betão de cal hidráulica sem adição de metacaulino, aumentando assim a viabilidade do betão de cal hidráulica para aplicação na construção.

Todos os provetes analisados, após conservação em câmara climática com 95% de humidade relativa durante os tempos de cura em estudo, ou seja, aos 28, 90 e 180 dias apresentaram níveis de carbonatação reduzidos apenas se verificando carbonatação ao nível da superfície do betão

Em profundidade, a adição de metacaulino ao betão de cal hidráulica resulta num aumento da resistência à penetração de iões cloreto. Tal como foi verificado para as propriedades anteriores, a composição com substituição parcial de 20% da cal hidráulica por metacaulino obteve os melhores resultados.

## 8.2. Perspectivas futuras

Através da realização deste trabalho e da análise dos resultados obtidos, apresentam-se algumas sugestões para possíveis investigações futuras:

- ✓ Realizar mais amassaduras de betão de cal hidráulica aditivado com metacaulino alterando a composição do betão para que se consiga produzir um betão com uma melhor trabalhabilidade;
- ✓ Realizar ensaios de avaliação da resistência à penetração de cloretos, em provetes com tempos de exposição superiores aos 28 dias, de forma a avaliar a evolução da permeabilidade do betão de cal hidráulica aos iões cloreto com o tempo;
- ✓ Proceder a outro tipo de ensaios para determinar outras características do betão, que não foram abrangidas no presente trabalho, como por exemplo a expansão por sulfatos (DEF) e a reacção alcalis-sílica.;



## 9. Bibliografia

Amândio Teixeira Plinto, "Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina do Metacaulino", Guimarães, 2004

Arikan, M., K. Sobolev, et al. (2009). "Properties of blended cements with thermally activated kaolin." *Construction and Building Materials* 23(1): 62-70.

Azevedo, A. F. F. L. C. d. (2002). "Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes". Escola de Engenharia. Minho, Universidade do Minho. Tese de Doutorament

Bai, J., S. Wild, et al. (2002). "Sorptivity and strength of air-cured and water-cured PC-PFA-MK concrete and the influence of binder composition on carbonation depth." *Cement and Concrete Research* 32(11): 1813-1821.

Bai, J., S. Wild, et al. (2003). "Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC-PFA-MK binder compositions exposed to synthetic seawater." *Cement and Concrete Research* 33(3): 353-362.

Batis, G., P. Pantazopoulou, et al. (2005). "The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars." *Cement & Concrete Composites* 27(1): 125-130.

Bothe, J. V. and P. W. Brown (2004). "PhreeqC modeling of Friedel's salt equilibria at 23 +/- 1 degrees C." *Cement and Concrete Research* 34(6): 1057-1063.

Brooks, J. J. and M. A. M. Johari (2001). "Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete." *Cement & Concrete Composites* 23(6): 495-502.

Cachim, P., A. L. Velosa, et al. (2010). "Effect of Portuguese metakaolin on hydraulic lime concrete using different curing conditions." *Construction and Building Materials* 24(1): 71-78.

Coutinho, A. D. S. (1997). *Fabrico e Propriedades do Betão*. Lisboa, Laboratório Nacional De Engenharia Civil.

Coutinho, A. De Sousa, "Fabrico e Propriedades do Betão", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Vol. 1, 1997.

Coutinho, A. De Sousa, "Fabrico e Propriedades do Betão", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Vol. 2, 1997.

Coutinho, J., "Agregados para argamassas e betões", 1999

Coutinho, A. De Sousa - Fabrico e Propriedades do Betão, volume 3 Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Vol. 3, 1994.

Ferreira, R. M. (2000). "Avaliação dos ensaios de durabilidade do Betão". Escola de Engenharia do Minho. Minho, Universidade do Minho. Tese de Mestrado.

Gruber, K. A., T. Ramlochan, et al. (2001). "Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin." *Cement & Concrete Composites* 23(6): 479-484.

Guerra, D. (2008). Propriedades Residuais De Betão De Cal Hidráulica ao Fogo. Departamento de Engenharia Civil. Aveiro, Universidade de Aveiro. Mestre.

J. Válek, C. G., J. J. Hughes (2010). Historic Mortars and RILEM TC 203-RHM Final Workshop HMC2010, Prague, Czech Republic, RILEM Publications S.a.r.l.

IPQ- Betão: Parte 1: Especificações, desempenho, produção e conformidade. Caparica: IPQ, 2007

IPQ- Eurocódigo - : Projecto de estruturas de betão: Parte 1-1: Regras gerais para edifícios.. Caparica: IPQ, 2000

Jain, J. and N. Neithalath (2011). "Electrical impedance analysis based quantification of microstructural changes in concretes due to non-steady state chloride migration." *Materials Chemistry and Physics* 129(1-2): 569-579.

Kaloumenou, M., E. Badogiannis, et al. (1999). "Effect of the kaolin particle size on the pozzolanic behaviour of the metakaolinite produced." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 56(2): 901-907.

Li, Z. J. and Z. Ding (2003). "Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag." *Cement and Concrete Research* 33(4): 579-584.

McPolin, D., P. A. M. Basheer, et al. (2005). "Obtaining progressive chloride profiles in cementitious materials." *Construction and Building Materials* 19(9): 666-673.

Monteiro, F. A. B., J. de Brito, R. Neves (2011). "Statistical analysis of the carbonation coefficient in open air concrete structures." *Construction and Building Materials* 29: 263-269.

Neville, A. M. (1975). *Properties of Concret*. London, Pitman.

Pereira, J. P. V. V. (1999). Avaliação da resistência à compressão do betão através de ensaios não-destrutivos. Departamento de Engenharia Civil. Coimbra, Universidade de Coimbra. Tese de Mestrado:134 pags.

Pinto, A. T. (2004). Sistemas Ligantes Obtidos Por Activação Alcalina Do Metacaulino. Escola de Engenharia. Guimarães, Universidade do Minho. Doutor.

Poon, C. S., S. C. Kou, et al. (2006). "Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete." *Construction and Building Materials* 20(10): 858-865.

Qian, X. Q. and Z. J. Li (2001). "The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin." *Cement and Concrete Research* 31(11): 1607-1611.

Ramlochan, T., M. Thomas, et al. (2000). "The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete." *Cement and Concrete Research* 30(3): 339-344.

Ramlochan, T., M. Thomas, et al. (2000). "The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete." *Cement and Concrete Research* 30(3): 339-344.

Sabir, B. B., S. Wild, et al. (2001). "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review." *Cement & Concrete Composites* 23(6): 441-454.

Sampaio, Joaquim, et al., "Melhoria do desempenho de betões pelo metacaulino", 43º congresso Brasileiro do concreto, 2001.

Siddique, R. and J. Klaus (2009). "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review." *Applied Clay Science* 43(3-4): 392-400.

Simas, M. d. S. L. (2007). "Sistemas de carbonatação do betão face à carbonatação". Instituto Superior Técnico. Lisboa, Instituto Superior Técnico de Lisboa. Tese de Mestrado

Song, H. W., C. H. Lee, et al. (2008). "Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments." *Cement & Concrete Composites* 30(2): 113-121.

Song, H. W., H. B. Shim, et al. (2009). "Service life prediction of repaired concrete structures under chloride environment using finite difference method." *Cement & Concrete Composites* 31(2): 120-127.

Souza, P. S. L. and D. C. C. Dal Molin (2005). "Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity." *Cement and Concrete Research* 35(10): 1993-1998.

Talero, R., L. Trusilewicz, et al. (2011). "Comparative and semi-quantitative XRD analysis of Friedel's salt originating from pozzolan and Portland cement." *Construction and Building Materials* 25(5): 2370-2380.

Thomas, M. D. A. (2011). "The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste." *Cement and Concrete Research*(ISSN 00088846)

Velosa, A. and P. Cachim (2007). *Eco-concrete: preliminary studies for concretes based on hydraulic lime*.

Velosa, A. L. and P. B. Cachim (2009). "Hydraulic-lime based concrete: Strength development using a pozzolanic addition and different curing conditions." *Construction and Building Materials* 23(5): 2107-2111.

Velosa, A. L. (2006). "Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas". Aveiro : Universidade de Aveiro. 250 f.

Wild, S., J. M. Khatib, et al. (1996). "Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete." *Cement and Concrete Research* 26(10): 1537-1544.





Apêndice I.

Na tabela seguinte encontram-se rerepresentadas as granulometrias dos agregados utilizados nas três composições de betão em estudo

**Tabela I.1. Granulometria dos agregados utilizados na produção do betão**

Abertura da malha (mm)	Brita 12/25				Brita 8/12				Areia			
	Material retido (g)	% Material retido	% Material retido acumulada	% Material Passado acumulada	Material retido (g)	% Material retido	% Material retido acumulada	% Material Passado acumulada	Material retido (g)	% Material retido	% Material retido acumulada	% Material Passado acumulada
0												
0,063	0,9	0,0	99,4	0,6	0,1	0,0	99,6	0,4	4,1	0,7	98,8	1,2
0,125	0,4	0,0	99,3	0,7	0,1	0,0	99,6	0,4	20,2	3,2	98,1	1,9
0,250	0,2	0,0	99,3	0,7	0,1	0,0	99,5	0,5	49,5	7,9	94,9	5,1
0,500	0,2	0,0	99,3	0,7	0,2	0,0	99,5	0,5	170,8	27,4	86,9	13,1
1,000	0,0	0,0	99,3	0,7	0,2	0,0	99,5	0,5	238,4	38,2	59,5	40,5
2,000	0,0	0,0	99,3	0,7	1,3	0,1	99,5	0,5	106,3	17,0	21,3	78,7
4,000	1,8	0,1	99,3	0,7	267,5	23,9	99,4	0,6	19,0	3,1	4,3	95,7
8,000	725,0	31,2	99,2	0,8	846,5	75,5	75,5	24,5	7,8	1,3	1,3	98,7
16,000	1578,7	68,0	68,0	32,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
31,500	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
63,000	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
fundo	0,0	0,0	-	-	0,0	0,0	-	-	0,0	0,0	-	-
soma de controlo	2307,2		862,4		1116,0		772,1		616,1		465,1	

**Tabela I.2. Parâmetros para definição da curva de referência e da curva da mistura**

Parâmetros	valor
D (mm)	31,50
R (mm)	31,50
D/2 (mm)	15,75
A	30
B	2

**Tabela I.3. Massas volúmicas dos agregados utilizados na produção do betão**

Componente	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
Brita 12/25	2650
Brita 8/12	2610
Areia	2200
Cal NHL5	2750

**Tabela I.4. Dosagem considerada para o cálculo da composição da mistura com 0% de metacaulino**

Dosagem de cal (kg/m <sup>3</sup> )	350,00
Razão água cal NHL5, w/c	0,50
Volume de vazios (m <sup>3</sup> )	0,02

**Tabela I.5. Volume de agregados por m<sup>3</sup> de mistura com 0% de metacaulino**

Agregados	Volume (m <sup>3</sup> )
Brita 12/25	0,2322
Brita 8/12	0,0966
Areia	0,3490

**Tabela I.6. Massa dos componentes do betão por m<sup>3</sup> de mistura com 0% de metacaulino**

Componente	Massa (kg)
Brita 12/25	615,23
Brita 8/12	252,13
Areia	767,91
Cal NHL5	350,00
Água	175,00
Total	2160,26

**Tabela I.7. Massa de componentes de betão para produzir 35 kg de betão da mistura com 0% de metacaulino (quantidade de betão necessária para produzir 10 provetes)**

Componente	Massa (kg)
Brita 12/25	9,97
Brita 8/12	4,08
Areia	12,44
Cal NHL5	5,67
Água	2,84
Total	35,00

**Tabela I.8. Volume de plastificante utilizado na mistura com 0% de metacaulino, utilizando uma razão de 0,6% de plastificante**

Volume de cal NHL5 (dm <sup>3</sup> )	Volume de plastificante (dm <sup>3</sup> )	Volume de plastificante (ml)
2,062	0,012	12,372

**Tabela I.9. Massa de componentes necessária para a produção de 35Kg de betão da mistura com 10% de metacaulino**

Componente	Massa, kg
Brita 12/25	9,97
Brita 8/12	4,08
Areia	12,44
Cal NHL5	5,10
Água	2,84
Metacaulino	0,57
Total	35,00

**Tabela I.10. Volume de plastificante utilizado nas misturas com 10% e 20 % de metacaulino, utilizando uma razão de 1,0% de plastificante**

Volume de cal NHL5 (dm <sup>3</sup> )	Volume de plastificante (dm <sup>3</sup> )	Volume de plastificante (ml)
2,062	0,021	20,620

**Tabela I.11. Massa de componentes necessária para a produção de 35Kg de betão da mistura com 20% de metacaulino**

Componente	Massa (kg)
Brita 12/25	9,97
Brita 8/12	4,08
Areia	12,44
Cal NHL5	4,54
Água	2,84
Metacaulino	1,13
Total	35,00

Tabela II.1. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M0 aos 28 dias de cura

Provetes	Tempo de percurso ( $\mu$ s)		TP médio ( $\mu$ s)	Velocidade de Propagação (km/s)	Qualidade do betão com base na velocidade de propagação	Módulo de elasticidade dinâmico Ed (MPa)	Módulo de elasticidade Estático Es (MPa)
P1	24,50	24,80	24,65	4,06	boa	29852	19136
P2	25,40	25,70	25,55	3,91	boa	27708	16708
P3	25,20	25,60	25,40	3,94	boa	28055	17055
P4	25,40	24,80	25,10	3,98	boa	28761	17761
P5	25,10	24,90	25,00	4,00	boa	29000	18000
P6	25,60	24,90	25,25	3,96	boa	28406	17406
P7	25,40	25,10	25,25	3,96	boa	28406	17406
P8	25,30	25,50	25,40	3,94	boa	28055	17055
P9	25,60	25,80	25,70	3,89	boa	27366	16366
média			25,26	3,96	boa	28400	17400
desvio padrão			0,23	0,04		538	578

Tabela II.2. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M0 aos 90 dias de cura

Provetes	Tempo de percurso ( $\mu$ s)		TP médio ( $\mu$ s)	Velocidade de Propagação (km/s)	Qualidade do betão com base na velocidade de propagação	Módulo de elasticidade dinâmico Ed (MPa)	Módulo de elasticidade Estático Es (MPa)
P1	23,9	24,7	24,3	4,12	boa	30728	20305
P2	24,6	24,1	24,4	4,11	boa	30602	20136
P3	25,0	25,8	25,4	3,94	boa	28055	17055
P4	24,2	25,6	24,9	4,02	boa	29241	18321
P5	25,2	25,8	25,5	3,92	boa	27824	16824
P6	24,3	24,9	24,6	4,07	boa	29976	19301
P7	24,8	25,2	25,0	4,00	boa	29000	18000
P8	25,6	25,8	25,7	3,89	boa	27366	16366
P9	25,7	25,4	25,6	3,91	boa	27708	16708
média			25,0	4,00	boa	28944	18113
desvio padrão			0,45	0,07		1072	1247

**Tabela II.3. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M0 aos 180 dias de cura**

Provetes	Tempo de percurso ( $\mu$ s)		TP médio ( $\mu$ s)	Velocidade de Propagação (km/s)	Qualidade do betão com base na velocidade de propagação	Módulo de elasticidade dinâmico Ed (MPa)	Módulo de elasticidade Estático Es (MPa)
P1	23,70	23,60	23,65	4,23	boa	32566,60	22708,25
P2	24,80	24,90	24,85	4,02	boa	29362,17	18482,90
P3	23,20	23,30	23,25	4,30	boa	34021,51	24526,88
P4	23,60	23,30	23,45	4,26	boa	33287,85	23609,81
P5	24,50	24,30	24,40	4,10	boa	30475,41	19967,21
P6	23,40	23,50	23,45	4,26	boa	33287,85	23609,81
P7	25,20	24,90	25,05	3,99	boa	28880,24	17880,24
P8	23,90	23,70	23,80	4,20	boa	32033,61	22042,02
P9	24,80	24,60	24,70	4,05	boa	29728,74	18971,66
média			24,07	4,16	boa	31516,00	21310,97
desvio padrão			0,61	0,10		1692,76	2209,31

**Tabela II.4. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M1 aos 28 dias de cura**

Provetes	Tempo de percurso ( $\mu$ s)		TP médio ( $\mu$ s)	Velocidade de Propagação (km/s)	Qualidade do betão com base na velocidade de propagação	Módulo de elasticidade dinâmico Ed (MPa)	Módulo de elasticidade Estático Es (MPa)
P1	22,8	22,4	22,6	4,42	boa	36743	27867
P2	23,4	22,7	23,1	4,34	boa	34768	25460
P3	23,2	23,3	23,3	4,30	boa	34022	24527
P4	23,1	23,2	23,2	4,32	boa	34393	24991
P5	22,4	22,6	22,5	4,44	boa	37333	28556
P6	23,4	22,9	23,2	4,32	boa	34393	24991
P7	23,4	22,9	23,2	4,32	boa	34393	24991
P8	22,7	22,8	22,8	4,40	boa	35912	26890
P9	23,5	23,9	23,7	4,22	boa	32388	22485
média			23,0	4,34	boa	34927	25640
desvio padrão			0,28	0,05		1157	1421

Tabela II.5. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M1 aos 90 dias de cura

Provetes	Tempo de percurso ( $\mu$ s)		TP médio ( $\mu$ s)	Velocidade de Propagação (km/s)	Qualidade do betão com base na velocidade de propagação	Módulo de elasticidade dinâmico Ed (MPa)	Módulo de elasticidade Estático Es (MPa)
P1	21,6	21,7	21,7	4,62	excelente	42663	34852
P2	22,8	22,7	22,8	4,40	boa	35912	26890
P3	21,9	21,8	21,9	4,58	excelente	41300	33183
P4	21,6	21,8	21,7	4,61	excelente	42290	34373
P5	22,3	22,4	22,4	4,47	boa	38228	29600
P6	21,8	21,9	21,9	4,58	excelente	41300	33183
P7	22,7	22,9	22,8	4,39	boa	35719	26649
P8	22,6	22,6	22,6	4,42	boa	36743	27867
P9	22,5	22,6	22,6	4,43	boa	37038	28211
média			22,2	4,50	excelente	39021	30534
desvio padrão			0,42	0,08		2548	2990

Tabela II.6. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M1 aos 180 dias de cura

Provetes	Tempo de percurso ( $\mu$ s)		TP médio ( $\mu$ s)	Velocidade de Propagação (km/s)	Qualidade do betão com base na velocidade de propagação	Módulo de elasticidade dinâmico Ed (MPa)	Módulo de elasticidade Estático Es (MPa)
P1	21,0	21,3	21,2	4,73	excelente	46485	39766
P2	20,3	21,2	20,8	4,82	excelente	49867	43867
P3	21,3	21,1	21,2	4,72	excelente	46094	39264
P4	20,6	21,0	20,8	4,81	excelente	49346	43346
P5	21,3	21,5	21,4	4,67	excelente	44551	37280
P6	21,5	21,6	21,6	4,64	excelente	43413	35817
P7	21,3	21,0	21,2	4,73	excelente	46485	39766
P8	20,8	20,9	20,9	4,80	excelente	48866	42827
P9	21,4	21,1	21,3	4,71	excelente	45706	38765
média			21,1	4,74	excelente	46888	40242
desvio padrão			0,23	0,05		1854	2329

**Tabela II.7. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M2 aos 28 dias de cura**

Provetes	Tempo de percurso ( $\mu$ s)		TP médio ( $\mu$ s)	Velocidade de Propagação (km/s)	Qualidade do betão com base na velocidade de propagação	Módulo de elasticidade dinâmico Ed (MPa)	Módulo de elasticidade Estático Es (MPa)
P1	21,8	22,1	22,0	4,56	excelente	40674	32453
P2	22,1	22,0	22,1	4,54	excelente	40054	31730
P3	22,1	21,8	22,0	4,56	excelente	40674	32453
P4	22,6	22,4	22,5	4,44	boa	37333	28556
P5	22,1	22,5	22,3	4,48	boa	38529	29951
P6	21,6	21,7	21,7	4,62	excelente	42663	34852
P7	22,4	22,6	22,5	4,44	boa	37333	28556
P8	21,3	21,8	21,6	4,64	excelente	43413	35817
P9	21,4	21,3	21,4	4,68	excelente	44934	37773
média			22,0	4,55	excelente	40623	32460
desvio padrão			0,32	0,07		2054	2458

**Tabela II.8. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M2 aos 90 dias de cura**

Provetes	Tempo de percurso ( $\mu$ s)		TP médio ( $\mu$ s)	Velocidade de Propagação (km/s)	Qualidade do betão com base na velocidade de propagação	Módulo de elasticidade dinâmico Ed (MPa)	Módulo de elasticidade Estático Es (MPa)
P1	21,5	21,9	21,7	4,61	excelente	42290	34373
P2	21,3	21,4	21,4	4,68	excelente	44934	37773
P3	22,1	22,2	22,2	4,51	excelente	39440	31014
P4	21,8	21,6	21,7	4,61	excelente	42290	34373
P5	21,3	21,4	21,4	4,68	excelente	44934	37773
P6	21,2	21,2	21,2	4,72	excelente	46094	39264
P7	21,4	21,5	21,5	4,66	excelente	44170	36790
P8	21,5	21,5	21,5	4,65	excelente	43791	36302
P9	21,6	21,5	21,6	4,64	excelente	43413	35817
média			21,6	4,64	excelente	43493	35958
desvio padrão			0,22	0,05		1615	2028

**Tabela II.9. Determinação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático dos provetes da composição M2 aos 180 dias de cura**

Provetes	Tempo de percurso ( $\mu\text{s}$ )		TP médio ( $\mu\text{s}$ )	Velocidade de Propagação (km/s)	Qualidade do betão com base na velocidade de propagação	Módulo de elasticidade dinâmico Ed (MPa)	Módulo de elasticidade Estático Es (MPa)
P1	20,8	20,7	20,8	4,82	Excelente	49867	43867
P2	21,1	21,2	21,2	4,73	Excelente	46485	39766
P3	20,3	19,8	20,1	4,99	Excelente	57439	51439
P4	20,2	19,8	20,0	5,00	Excelente	58000	52000
P5	19,9	20,4	20,2	4,96	Excelente	56325	50325
P6	20,0	20,3	20,2	4,96	Excelente	56325	50325
P7	20,5	20,4	20,5	4,89	Excelente	53049	47049
P8	20,6	20,5	20,6	4,87	Excelente	51978	45978
P9	20,4	20,3	20,4	4,91	Excelente	54130	48130
média			20,4	4,90	Excelente	53733	47653
desvio padrão			0,29	0,07		3012	3101

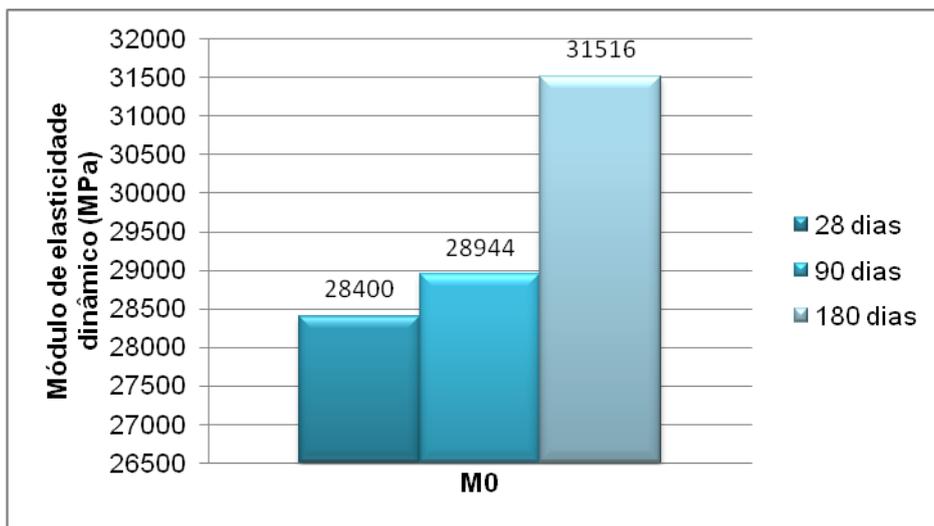


Figura II.1. Gráfico de barras referente á evolução do módulo de elasticidade dos provetes da composição M0 nas três idades em estudo

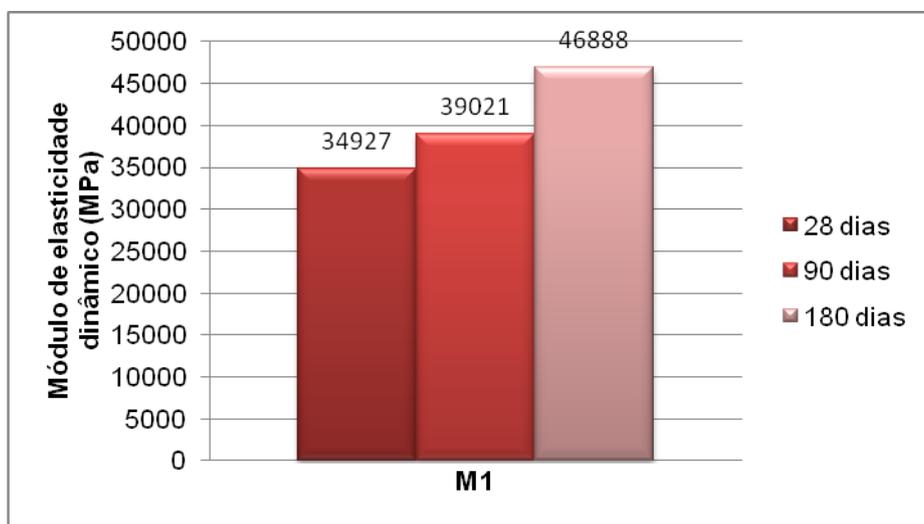


Figura II.2. Gráfico de barras referente á evolução do módulo de elasticidade dos provetes da composição M1 nas três idades em estudo

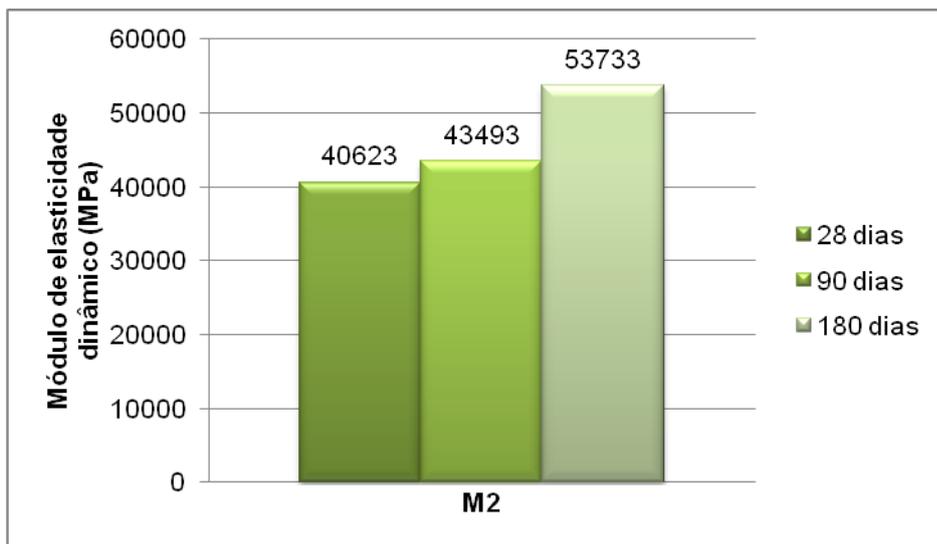


Figura II.3. Gráfico de barras referente à evolução do módulo de elasticidade dos provetes da composição M2 nas três idades em estudo



Tabela III.1. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M0 aos 28 dias

Provetes	Massa (kg)	Força compressão (MPa)
P1	2,28	7,2
P2	2,22	6,6
P3	2,26	7,1
P4	2,26	7,8
P5	2,27	7,7
P6	2,25	7,3
P7	2,24	7,2
P8	2,22	6,9
P9	2,17	6,5
média	2,24	7,1
desvio padrão	0,03	0,33

Tabela III.2. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M0 aos 90 dias

Provetes	Massa (kg)	Força compressão (MPa)
P1	2,20	9,3
P2	2,20	9,1
P3	2,24	9,7
P4	2,22	9,3
P5	2,19	8,6
P6	2,15	8,2
P7	2,22	9,3
P8	2,21	9,4
P9	2,19	8,9
média	2,20	9,1
desvio padrão	0,02	0,35

Tabela III.3. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M0 aos 180 dias

Provetes	Massa (Kg)	Força compressão (Mpa)
P1	2,27	25,5
P2	2,29	25,7
P3	2,24	24,8
P4	2,30	25,5
P5	2,28	23,5
P6	2,29	23,6
P7	2,26	24,7
P8	2,23	24,5
P9	2,27	25,0
média	2,27	24,8
desvio padrão	0,02	0,60

Tabela III.4. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M1 aos 28 dias

Provetes	Massa (kg)	Força compressão (MPa)
P1	2,31	12,4
P2	2,23	11,9
P3	2,28	12,8
P4	2,25	12,7
P5	2,28	12,3
P6	2,24	12,8
P7	2,25	12,7
P8	2,26	11,7
P9	2,20	11,5
média	2,25	12,3
desvio padrão	0,03	0,41

Tabela III.5. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M1 aos 90 dias

Provetes	Massa (kg)	Força compressão (MPa)
P1	2,26	14,0
P2	2,23	13,4
P3	2,26	13,8
P4	2,26	13,4
P5	2,26	13,3
P6	2,26	13,9
P7	2,25	13,6
P8	2,25	12,9
P9	2,24	12,8
média	2,25	13,5
desvio padrão	0,01	0,33

Tabela III.6. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M1 aos 180 dias

Provetes	Massa (kg)	Força compressão (MPa)
P1	2,25	15,7
P2	2,25	16,9
P3	2,18	15,8
P4	2,28	17,7
P5	2,26	17,5
P6	2,21	14,6
P7	2,24	16,7
P8	2,25	15,3
P9	2,23	15,6
média	2,24	16,2
desvio padrão	0,02	0,89

Tabela III.7. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M2 aos 28 dias

Provetes	Massa (kg)	Força compressão (MPa)
P1	2,27	17,20
P2	2,23	16,20
P3	2,25	17,10
P4	2,26	16,20
P5	2,24	16,60
P6	2,26	16,80
P7	2,26	16,50
P8	2,29	17,30
P9	2,28	16,90
média	2,26	16,76
desvio padrão	0,01	0,34

Tabela III.8. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M2 aos 90 dias

Provetes	Massa (kg)	Força compressão (MPa)
P1	2,27	18,6
P2	2,26	20,0
P3	2,27	19,2
P4	2,25	19,1
P5	2,27	18,2
P6	2,27	17,1
P7	2,26	17,6
P8	2,28	17,9
P9	2,26	18,9
média	2,26	18,5
desvio padrão	0,01	0,72

Tabela III.9. Resultados do ensaio de compressão dos provetes da composição M2 aos 180 dias

Provetes	Massa (kg)	Força compressão (MPa)
P1	2,27	25,5
P2	2,29	25,7
P3	2,24	24,8
P4	2,30	25,5
P5	2,28	23,5
P6	2,29	23,6
P7	2,26	24,7
P8	2,23	24,5
P9	2,27	25,0
média	2,27	24,8
desvio padrão	0,02	0,60

Figura III.1. Gráfico de barras referente à evolução da resistência à compressão dos provetes da composição M0 com o tempo de cura

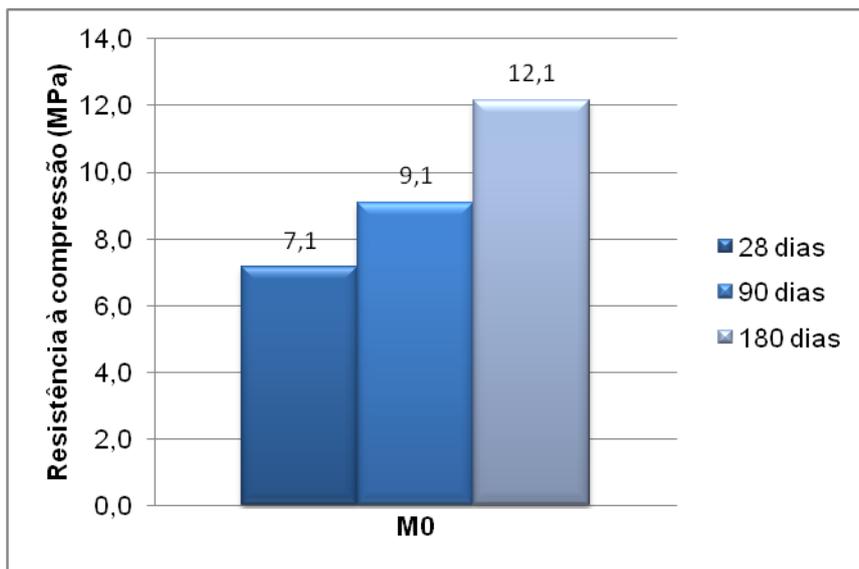


Figura III.2. Gráfico de barras referente à evolução da resistência à compressão dos provetes da composição M0 com o tempo de cura

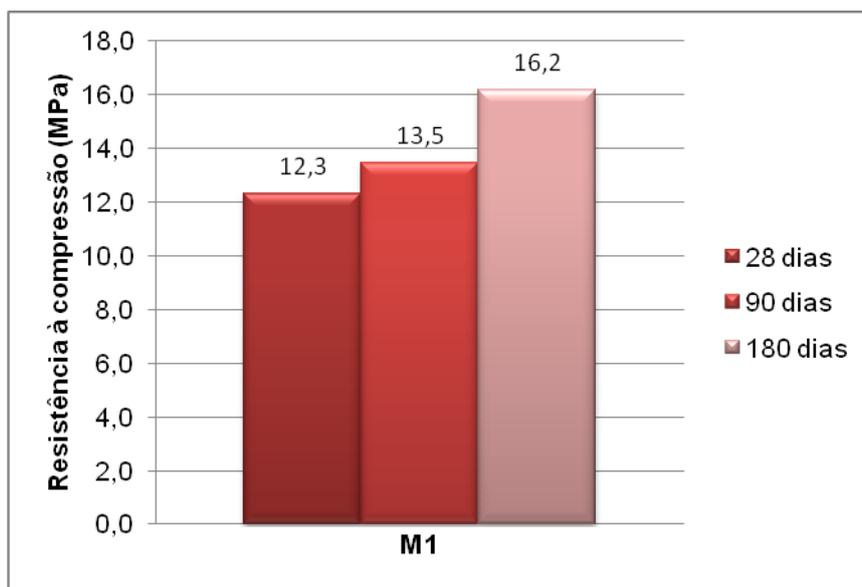


Figura III.3. Gráfico de barras referente à evolução da resistência à compressão dos provetes da composição M0 com o tempo de cura

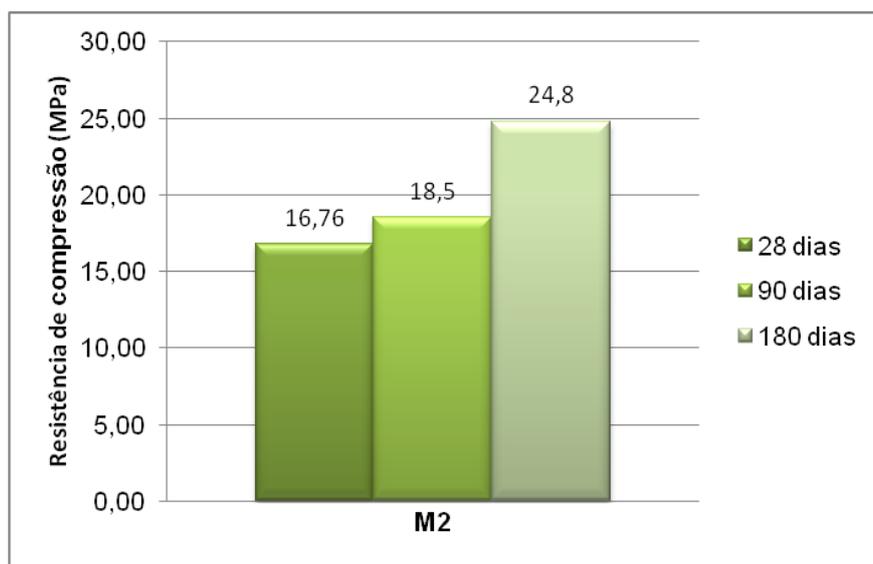


Tabela IV.1. Volume da amostra sujeita ao ensaio de adição padrão e concentração da solução da adição padrão

Volume de amostra, $V_0$ (ml)	50
Concentração do padrão, $C_0$ (mg/l)	10000

Tabela IV.2. Resultados obtidos para as concentrações de iões cloreto para as diferentes composições e em diferentes profundidades, para os provetes com 28 dias de cura em câmara húmida

Amostras	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	toma amostra (g)	balão (ml)	toma (ml)	Cl <sup>-</sup> (mg/kg)
M0-1	37,24	5,02	500,0	50,00	3707
M0-2	10,19	5,00	500,0	50,00	1019
M0-3	6,79	5,00	500,0	50,00	679
M1-1	56,23	5,01	500,0	50,00	5609
M1-2	3,24	5,01	500,0	50,00	323
M1-3	2,00	20,03	500,0	50,00	50
M2-1	57,46	10,01	500,0	50,00	2871
M2-2	3,30	10,02	500,0	50,00	82
M2-3	1,20	20,02	250,0	50,00	15

Tabela IV.2. Resultados obtidos para as concentrações de iões cloreto para as diferentes composições e em diferentes profundidades, para os provetes com 28 dias de cura em câmara húmida

Amostras	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	toma amostra (g)	balão (ml)	toma (ml)	Cl <sup>-</sup> (mg/kg)
M0-1	54,41	5,01	500,0	50,00	5428
M0-2	15,40	5,02	500,0	50,00	1535
M0-3	9,05	5,01	500,0	50,00	902
M1-1	72,94	5,01	500,0	50,00	7278
M1-2	10,19	10,01	500,0	50,00	509
M1-3	4,04	20,03	250,0	50,00	50
M2-1	95,74	10,02	500,0	50,00	4779
M2-2	9,14	20,01	500,0	50,00	228
M2-3	10,37	20,01	250,0	50,00	130



