



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

João Paulo da Silva Melo

Incorporação de Cal em Misturas Cimentícias  
com Elevados Teores de Adições Minerais





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

João Paulo da Silva Melo

Incorporação de Cal em Misturas Cimentícias  
com Elevados Teores de Adições Minerais

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

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Aires Camões

Dezembro de 2012

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Doutor Aires Camões, meu orientador da tese de mestrado, todo o apoio concedido, orientação e incentivo ao longo deste trabalho. Foi um importante auxílio em todas as etapas desta pesquisa e uma ajuda preciosa na realização e interpretação dos resultados laboratoriais.

A todos os meus professores que, durante o meu curso, me transmitiram os seus conhecimentos e sabedoria e me mostraram a importância da engenharia na sociedade e na construção de um mundo melhor.

Aos técnicos do laboratório de Engenharia Civil que se mostraram sempre disponíveis e prontos a colaborarem na realização dos ensaios, providenciando que o laboratório estivesse sempre pronto a funcionar e existisse todo o material necessário.

A todos os meus colegas e amigos que, ao longo destes anos, participaram comigo em momentos importantes de grande estudo e em momentos de confraternização e camaradagem.

À minha família e namorada (Maria), agradeço o estímulo e a sua presença incondicional.

A todos que me auxiliaram de uma forma direta ou indiretamente na realização deste trabalho o meu muito obrigado.



## **RESUMO**

A indústria do betão gera alguns problemas ambientais e de sustentabilidade associados à incorporação do Cimento Portland, cujo fabrico é, conforme sabido, altamente consumidor de energia e é responsável por cerca de 7% das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

As adições minerais Pozolânicas permitem substituir o Cimento, contribuindo com uma quantidade adicional de silicatos de cálcio hidratado (CSH). Para a formação do CSH adicional a pozolana tem de reagir com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do Cimento, originando a reação pozolânica. Por vezes, para dosagens elevadas de adições minerais, o hidróxido de cálcio pode ser insuficiente para o bom funcionamento da reação pozolânica, situação em que pode ser necessária a sua adição. Esta reação, geralmente, produz uma redução da porosidade do betão, afetando ao betão maior durabilidade. Esta substituição apresenta inúmeros benefícios, tanto em relação à reologia no estado fresco quanto ao comportamento mecânico no estado endurecido.

Neste contexto, desenvolveu-se este trabalho tendo como principal objetivo estudar a incorporação de cal em misturas cimentícias com elevados teores de adições minerais. Concretamente pretende-se analisar o efeito da incorporação de cal como potencial ativador da reação pozolânica em misturas com quantidades reduzidas de Cimento. Adicionalmente, pretende-se, também, determinar se a adição de cal permite, ou não, dotar a composição de uma maior reserva alcalina e, assim, melhorar a sua resistência à carbonatação. Para isto, realizaram-se doze tipos de composições cimentícias com dois tipos de matriz ligante, Cimento e Cinzas volantes; e Cimento, Cinzas volantes e Metacaulino. Em todas as composições, a quantidade de substituição de Cimento por adições minerais foi de, pelo menos, 60%. Para cada um destes dois tipos de matrizes cimentícias fez-se variar o teor de cal entre 0 e 25%. Neste trabalho experimental, para a mistura ternária, observou-se uma melhoria na resistência à compressão e à carbonatação para as misturas com incorporação de cal até 15%. Esta tendência foi acompanhada nas misturas com Cimento e Cinzas volantes, onde a resistência à compressão, perto da última data de ensaio (90 dias), aumentou relativamente à da amostra Padrão para um teor de Cal de 5% e a resistência à Carbonatação foi melhorada independentemente do teor de cal adicionada.

## **PALAVRAS-CHAVE:**

Adição Mineral; Reação Pozolânica; Pozolanas; Hidróxido de Cálcio; Carbonatação.



## **ABSTRACT**

The concrete industry generates some environmental and sustainability issues associated with the incorporation of Portland cement, whose manufacture is, as well known, highly energy consumer and responsible for about 7% of CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere.

The Pozzolanic mineral additions allow substitute the cement, contributing with an additional amount of hydrated calcium silicate (CSH). For the formation of the additional CSH, the pozzolan must react with the calcium hydroxide from the hydration of the cement, resulting in the pozzolanic reaction. Sometimes, for high dosages of mineral additions, calcium hydroxide may be insufficient for proper functioning of the pozzolanic reaction, situation in which may be necessary its addition. This reaction, usually, produces a decrease in the porosity of the concrete, assessing the concrete a bigger durability. This substitution has many benefits, for the rheology in fresh state as well as the mechanical behavior in the hardened state.

In this context, this work was developed with the main objective of studying the incorporation of lime in cementitious mixtures containing large amounts of mineral additions. Specifically, it is intended to analyze the effect of the incorporation of lime as a potential activator of the pozzolanic reaction in mixtures with small quantities of cement. Additionally, the aim was also to determine whether the addition of lime allows, or not, to give the composition an increased alkalinity and thus improve its resistance to carbonation. With this purpose, there were made twelve types of cementitious compositions with two types of matrix binder, Cement and fly ash, and cement, fly ash and Metakaolin. In all compositions, the amount of cement replacement by mineral additions was, at least, 60%. For each of these two types of cementitious matrixes was used a variation of the content of lime between 0 and 25%. In this experimental work, for the ternary blend, we observed an improvement in the resistance to the compressive strength and the carbonation for the blends incorporating lime up to 15%. This tendency was accompanied in mixtures with cement and fly ash, where the compression resistance near the last day of the test (90 days) increased compared to that of the standard sample for a content of 5% of lime, and the resistance to carbonation was improved independently of the amount of lime added.

## **KEYWORDS**

Addition Mineral; Pozzolanic Reaction; Pozzolans; Calcium Hydroxide; Carbonation.





**ÍNDICE**

AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
ÍNDICE DE TABELAS .....	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento e justificação do tema.....	1
1.2 Motivação.....	3
1.3 Objetivos específicos.....	4
1.4 Organização do tema .....	4
2 ESTADO DO CONHECIMENTO.....	6
2.1 Processos químicos e hidratação do Cimento .....	6
2.2 Pozolanas.....	11
2.2.1 Pozolanas Naturais .....	12
2.2.2 Pozolanas artificiais.....	13
2.2.3 Pozolanas derivadas dos subprodutos .....	14
2.3 Reação Pozolânica.....	14
2.3.1 Fatores que influenciam a atividade pozolânica.....	16
2.3.2 Reatividade pozolânica do Metacaulino e das Cinzas volantes .....	18
2.3.3 Reatividade pozolânica do Metacaulino e das Cinzas volantes e sua evolução com o tempo.....	24
2.4 Influência dos minerais e da cal em misturas cimentícias.....	26

2.4.1	Betão de elevado volume de Cinzas volantes .....	26
2.4.2	Betão com Cinzas volantes e Metacaulino .....	28
2.4.3	Hidróxido de cálcio em misturas cimentícias. ....	31
3	MATERIAIS .....	38
3.1	Areia.....	39
3.2	Cinzas volantes .....	41
3.3	Cimento.....	42
3.4	Metacaulino.....	44
3.5	Superplastificante.....	47
3.5.1	Glenium Sky 617 .....	48
3.6	Cal Hidratada .....	49
4	DESCRIÇÃO DO TRABALHO EXPERIMENTAL.....	50
4.1	Constituição da Matriz Cimentícia .....	50
4.2	Amassadura .....	52
4.3	Preparação dos provetes.....	54
4.4	Moldagem dos provetes .....	54
4.5	Desmoldagem dos provetes .....	55
4.6	Ensaio estado fresco .....	55
4.6.1	Espalhamento (Slump-flow test).....	55
4.7	Ensaio estado endurecido .....	56
4.7.1	Compressão.....	56
4.7.2	Absorção de Água por Capilaridade .....	58
4.7.3	Absorção de Água por Imersão à pressão atmosférica .....	61
4.7.4	Carbonatação.....	62
5	ANÁLISE DE RESULTADOS .....	66
5.1	Ensaio ao estado fresco .....	66
5.1.1	Espalhamento (Slump-flow test).....	66

---

5.2 Ensaio estado endurecido, amostras constituídas por Cimento, Cinzas volantes e Metacaulino .....	67
5.2.1 Compressão .....	67
5.2.2 Absorção de Água por Imersão à pressão atmosférica.....	70
5.2.3 Absorção de Água por Capilaridade.....	71
5.2.4 Carbonatação .....	73
5.3 Ensaio estado endurecido, amostras constituídas por Cimento e Cinzas volantes .....	75
5.3.1 Compressão .....	75
5.3.2 Absorção de Água por Imersão à pressão atmosférica.....	77
5.3.3 Absorção de Água por Capilaridade.....	78
5.3.4 Carbonatação .....	80
5.4 Ensaio estado endurecido, análise comparativa entre os compósitos com e sem Metacaulino .....	80
5.4.1 Compressão .....	80
5.4.2 Absorção de Água por Imersão à pressão atmosférica.....	81
5.4.3 Absorção por capilaridade .....	82
6 CONCLUSÕES .....	84
6.1 Apreciações Gerais .....	84
6.2 Trabalhos Futuros .....	86
7 BIBLIOGRAFIA .....	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Representação esquemática das noções da teoria da percolação. ....	8
Figura 2- Estágios da hidratação. ....	8
Figura 3- Análise Granulométrica do MCA .....	19
Figura 4- Análise Granulométrica do MCI .....	20
Figura 5- Análise Granulométrica das CV .....	20
Figura 6- Variação do IA entre os 28 e os 90 dias .....	26
Figura 7- Resistência à compressão ( $f_{cm, cubo}$ ) .....	27
Figura 8- Trabalhabilidade, espalhamento. ....	29
Figura 9- Resistência a compressão aos 28 e 90 dias. ....	30
Figura 10- Coeficiente de absorção capilar aos 28 dias. ....	31
Figura 11- Cursa Granulométrica da areia. ....	40
Figura 12- Valores indicativos de resistência à compressão de betão fabricado com 350 kg/m <sup>3</sup> de Cimento CEM I 43,5R .....	43
Figura 13- Misturadora. ....	53
Figura 14- Recipiente onde se procedeu a amassadura. ....	53
Figura 15- Moldes Usados. ....	54
Figura 16- Ensaio à compressão .....	58
Figura 17- Recipiente onde se efetuou a Absorção capilar. ....	60
Figura 18- Recipiente onde se realizou a absorção capilar (Recipiente fechado) .....	60
Figura 19- Pesagem da massa hidrostática do provete saturado, expressa em gramas. ....	62
Figura 20- Processo de carbonatação simplificado. ....	63
Figura 21- Fatia de argamassa carbonatada .....	65
Figura 22- Espalhamento realizado, comparação de resultados/versão gráfico .....	67
Figura 23- Evolução da resistência à compressão das amostras M20CV50CH com o tempo	68
Figura 24- Lixiviação .....	70
Figura 25- Absorção de Água por Imersão das amostras M20CV50CH. ....	71
Figura 26- Evolução da absorção capilar, pesagens efetuadas nos 2 primeiros dias para as misturas com Metacaulino .....	72
Figura 27- Coeficiente da absorção capilar das mostras M20CV50CH .....	72

---

Figura 28- Profundidade de carbonatação das misturas com Metacaulino, em função do tempo.....	74
Figura 29- Coeficiente de Carbonatação das misturas M20CV50CH.....	74
Figura 30- Evolução da resistência a compressão das amostras CV60CH .....	76
Figura 31- Absorção de Água por Imersão das misturas do tipo CV50CH .....	77
Figura 32- Evolução da absorção capilar, pesagens efetuadas nos 2 primeiros dias para as misturas sem Metacaulino .....	78
Figura 33- Coeficiente de Absorção de Absorção de Água por Capilaridade, misturas CV50CH.....	79
Figura 34- Coeficiente de Carbonatação das misturas sem metacaulino .....	80
Figura 35- Absorção de Água por Imersão das misturas CV60CH e M20CV50CH .....	82
Figura 36- Coeficiente de Absorção Capilar das misturas CV50CH e M20CV50CH.....	83

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Óxidos presentes no Cimento Portland.....	7
Tabela 2- Principais Características dos Produtos de hidratação do Cimento Portland. ....	10
Tabela 3- Pozolanas Naturais.....	12
Tabela 4- Pozolanas artificiais. ....	13
Tabela 5- Densidade e massa volúmica aparente.....	19
Tabela 6- Superfície Especifica Blaine.....	20
Tabela 7- Classificação de pozolanas segundo o Caderno de Encargos para o Fornecimento e Receção de Pozolanas. ....	21
Tabela 8- Resistência à flexão e à compressão, através do ensaio RBLH.....	22
Tabela 9- Requisitos para pozolanas segundo a ASTM C593-95 .....	22
Tabela 10- Resistência a compressão segundo ASTM C593-95 .....	23
Tabela 11- Avaliação da atividade pozolânica por medição da condutividade .....	23
Tabela 12- Variação da condutividade.....	23
Tabela 13- Composição química (% em massa) e superfície especifica (Blaine). ....	25
Tabela 14- Resultados do Índice de Atividade de acordo com a NP EN 450-1 .....	25
Tabela 15- Composições realizadas por Camões, 2011.....	28
Tabela 16- Composições realizadas.....	29
Tabela 17- Legenda das misturas aglomerantes em estudo. ....	34
Tabela 18- Denominação e teor de adição mineral por mistura aglomerante investigada. ....	34
Tabela 19- Quantidades de materiais empregados por m <sup>3</sup> de betão.....	35
Tabela 20- Resistência à compressão das misturas em estudo, aos 91 dias de idade. ....	36
Tabela 21- Absorção capilar de água das misturas em estudo.....	37
Tabela 22- Análise Granulométrica da areia.....	39
Tabela 23- Propriedades Gerais das Cinzas volantes de Compostilla. ....	41
Tabela 24- Propriedades Físicas das Cinzas volantes de Compostilla.....	41
Tabela 25- Propriedades Químicas das Cinzas volantes de Compostilla. ....	42
Tabela 26- Caraterísticas Mecânicas.....	43
Tabela 27- Caraterísticas Químicas. ....	43

---

Tabela 28 – Caraterísticas Físicas. ....	43
Tabela 29- Propriedades físicas de um MtK comercial.....	45
Tabela 30- Composição do Cimento e MtK.....	45
Tabela 31- Propriedades do Metacaulino utilizado. ....	47
Tabela 32- Características técnicas Glenium Sky 617 .....	49
Tabela 33- Composição base para o traço adotado. ....	51
Tabela 34- Constituintes e suas quantidades na constituição das diferentes argamassas (kg) .	52
Tabela 35- Resultados do ensaio do espalhamento das amassaduras realizadas.....	66
Tabela 36- Dados numéricos do ensaio à compressão das amostras M20CV50CH expressos em MPa.....	68
Tabela 37- Coeficiente de absorção capilar, de acordo com a Classe de qualidade segundo Browne, 1991 .....	73





# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento e justificação do tema

Nas últimas décadas o crescente crescimento da construção levantou alguns problemas ambientais e de sustentabilidade.

A atual crise económica que afeta vários países no mundo prejudica o investimento. O elevado número de fogos já construídos, por vezes, não possuem habitantes. A população tende a permanecer mais tempo na mesma casa evitando assim investimentos difíceis. O elevado número de construções atuais exige um planeamento construtivo com vista à durabilidade dos edifícios já existentes, favorecendo, assim, uma melhor evolução económica e ambiental.

O planeta Terra tem um tempo limitado de existência e cabe ao ser Humano adotar meios e boas opções para prolongar esse período. Tendo como presente tal situação, a União Europeia (UE) adotou a “Estratégia 2020” que entre outras medidas, comparativamente com 1990, em 2020, esta estratégia pretende reduzir em 20% as emissões de gases de estufa, pretende que 20% da energia provenha de energias renováveis e que a eficiência energética seja melhorada em 20%.

A produção anual de betão ronda as 25.000 milhões de toneladas, das quais cerca de 3.000 milhões representam Cimento Portland na sua incorporação. A produção de 1 tonelada de Cimento Portland liberta cerca de 1 tonelada de dióxido de carbono que, assim, contribui para cerca de 7% do total das emissões dos gases com efeito de estufa. O elevado consumo energético no processo de fabrico do Cimento Portland, devido às altas temperaturas utilizadas é outro impacto ambiental adverso (Camões, 2011).

O betão, devido à sua enorme utilização é uma boa opção para, na sua composição, incorporar grandes quantidades de resíduos e subprodutos industriais como, por exemplo, Cinzas

volantes (CV) evitando a sua deposição em aterros que aumentaria, conseqüentemente, a poluição.

Em Portugal existem duas centrais termoelétricas cujo combustível utilizado é o carvão, estas centrais em 2008 produziram cerca de 500.000 toneladas de CV e em Portugal quase todas são utilizadas pela indústria do betão (91%) (Camões, 2011).

O estudo da utilização das CV e as vantagens alcançadas na sua utilização não é apenas um assunto nacional. A produção mundial de cinzas de carvão é estimada em 700 milhões de toneladas por ano, sendo 70% Cinzas volantes. Infelizmente apenas 20% das Cinzas volantes produzidas mundialmente são utilizadas para o fabrico de Cimento e betão. Por isso, de modo assegurar um desenvolvimento sustentável da indústria do betão, o emprego de subprodutos pozzolânicos e cimentícios deve ser encorajado e substancialmente aumentado (Camões, 2011 cit. Malhotra e Mehta, 2002).

Segundo Camões (2011), os requisitos de projeto em betão são facilmente alcançáveis, com elevada incorporação de CV, construindo-se, assim, estruturas mais duráveis, contribuindo significativamente para a sustentabilidade da construção.

Em contrapartida, os betões com elevado volume de Cinzas volantes, apresentam alguns inconvenientes, tais como: desenvolvimento de resistências mais lento e reduzidas resistências em idades jovens; maior sensibilidade à cura; elevada retração plástica e redução da resistência à carbonatação. Com o objetivo de impedir ou minimizar estes fatores adversos, é aconselhável a incorporação no Betão de Elevado Volume de Cinzas volantes (BEVCV), outras adições minerais que evitem e corrijam os principais inconvenientes associados à substituição dos elevados volumes de Cimento por Cinzas volantes. Um bom mineral que se pode adicionar a esta mistura é o Metacaulino (MtK), que apresenta propriedades ambientais muito interessantes. A adição cumulativa de MtK em betões com grande quantidade de Cinzas volantes, pode permitir compensar a reduzida resistência dos BEVCV em idades jovens (Camões, 2011).

Muitas soluções na indústria da construção, indo de encontro a “Estratégia 2020” e, em parte, à durabilidade das estruturas, podem ser implementadas.

Nesta dissertação apenas vão ser apresentadas soluções relativamente à incorporação de cal e adições minerais em misturas cimentícias.

A utilização de pozolanas como substituto do Cimento Portland apresenta inúmeros benefícios, tanto em relação à reologia no estado fresco quanto ao comportamento mecânico e de durabilidade no estado endurecido.

A substituição parcial do Cimento por pozolanas implica na economia uma redução na energia de produção associada ao custo de fabricação do Cimento. Além disso, a substituição parcial do Cimento Portland, provoca um aumento da capacidade de produção sem necessidade de grandes investimentos, aproveitando por exemplo, as Cinzas volantes.

Tendo em conta o panorama atual em que vivemos, uma substituição parcial do Cimento Portland, por adições minerais, antevê-se interessante.

## **1.2 Motivação**

A reação pozolânica está dependente da disponibilidade de hidróxido de cálcio. Segundo (Pontes, 2011 cit. Coutinho, 1958), a reatividade pozolânica é a capacidade de um material em se combinar quer com o hidróxido de cálcio quer com os constituintes do Cimento hidratado.

O hidróxido de cálcio, para a realização da reação pozolânica é, em parte, produzido pela hidratação do Cimento. Neste trabalho experimental, vai-se trabalhar com substituição de Cimento de pelo menos 60%, por substâncias minerais. Devido à natureza das substituições e quantidades relativas aplicadas, este trabalho tem como principal objetivo, a inserção de cal na mistura cimentícia com o intuito, de juntamente com o hidróxido de cal proveniente da hidratação do Cimento, ativar a reação pozolânica. O principal objetivo neste trabalho é tentar estimar a quantidade de hidróxido de cálcio ideal para a realização da reação pozolânica em estudo, maximizando-se assim os benefícios inerentes a este processo.

A carbonatação é um processo físico-químico de neutralização da fase líquida do betão, saturada de hidróxido de cálcio e outros compostos alcalinos hidratados. A neutralização da fase líquida do betão provoca uma diminuição do pH que em contacto com a armadura do betão promove a sua despassivação afetando a sua durabilidade. A adição de Cal aumenta o teor remanescente da Cal, tornando mais difícil a neutralização por parte do CO<sub>2</sub>. A Cal

quando também interveniente na reação pozolânica origina uma redistribuição porosa, geralmente dificultando a penetração do  $\text{CO}_2$ .

A adição de cal, será percentualmente crescente relativamente ao ligante, variando esta percentagem entre 0 a 25%.

### **1.3 Objetivos específicos**

Esta dissertação tem como objetivo: Analisar o efeito da incorporação de cal como ativador da reação pozolânica, avaliar o desempenho da cal em misturas com quantidades reduzidas de Cimento, efetuar ensaios diversos para avaliar as diferentes resistências das misturas cimentícias (seus benefícios e inconvenientes), analisar a resistência a fatores variados como, resistência a compressão, resistência à carbonatação e a absorção por capilaridade e por imersão.

### **1.4 Organização do tema**

Esta dissertação está dividida em sete capítulos.

O capítulo 1 é a Introdução desta dissertação. A Introdução desta dissertação enquadra o tema na atualidade e refere a sua importância.

O capítulo 2 é referente ao estado do conhecimento. Neste capítulo foram abordados trabalhos semelhantes sobre o tema que foram benéficos no enquadramento e desenvolvimento deste trabalho, analisando-se como se procede as reações da hidratação do Cimento, as reações pozolânicas, a reatividade pozolânica do Metacaulino e das Cinzas volantes e a influência dos minerais e da cal em misturas cimentícias.

O capítulo 3 é alusivo aos Materiais. Neste capítulo é efetuada uma análise dos materiais usados com o objetivo de caracterizar as composições dos materiais aplicados nesta dissertação, elegendo-os das suas propriedades mais relevantes.

O capítulo 4 é relativo à descrição do trabalho experimental. Este capítulo descreve como se procedeu para a definição da constituição das matrizes cimentícias, sua amassadura,

preparação dos provetes, moldagem e desmoldagem. Acrescenta ainda, sobre os ensaios realizados, o procedimento adotado e como serão analisados os resultados provenientes de cada um dos ensaios.

O capítulo 5 é relativo à análise dos resultados. Este capítulo através da compilação dos resultados obtidos, analisa-os, sendo dadas explicações desses resultados à luz dos objetivos desta dissertação.

O capítulo 6 é referente às conclusões. As conclusões visam responder às questões inerentes à realização deste trabalho.

O capítulo 7 corresponde à Bibliografia.

## **2 ESTADO DO CONHECIMENTO**

Tendo em conta os objetivos desta dissertação, neste capítulo analisar-se-ão os conteúdos importantes que farão compreender como a cal pode interferir nas propriedades das matrizes cimentícias. Avaliar-se-ão, também, a forma como ocorrem as reações da hidratação do Cimento, as reações pozolânicas, a reatividade pozolânica do Metacaulino e das Cinzas volantes, e como alguns substituintes minerais do Cimento podem definir ou alterar as propriedades das misturas em que são empregues.

Este capítulo será dividido em:

- Processos químicos e hidratação do Cimento;
- Pozolanas;
- Reações pozolânicas;
- Reatividade Pozolânica do Metacaulino e das Cinzas volantes
- Reatividade Pozolânica do Metacaulino e das Cinzas volantes e sua evolução com o tempo
- Influência dos minerais e da cal em misturas cimentícias;

### **2.1 Processos químicos e hidratação do Cimento**

O Cimento Portland é composto por vários compostos cálcicos, em forma de óxidos. Estes, estão expressos em função da sua abreviatura na Tabela 1.

Tabela 1- Óxidos presentes no Cimento Portland.

<b>Óxido</b>	<b>Abreviatura</b>
CaO	C
SiO <sub>2</sub>	S
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F
MgO	M
SO <sub>3</sub>	S̄

Fonte: “Materiais Pozolânicos” Adaptado a Netto, 2006 cit. Metha e Monteiro, 1994 apud Peruzzi, 2002 p. 22

Segundo (Netto, 2006 cit. Peruzzi, 2002), os constituintes essenciais do Cimento Portland são: A cal (CaO), a sílica (SiO<sub>2</sub>), a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), uma certa quantidade de magnésia (MgO) e uma pequena quantidade de anidrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>), adicionado após a calcinação para retardar o tempo de presa do produto. Este autor acrescenta que em menores quantidades há a existência de impurezas, óxidos de sódio (Na<sub>2</sub>O), óxido de potássio (K<sub>2</sub>O), óxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) e outras substâncias mais irrelevantes.

A hidratação do Cimento pode ser analisada como a soma das reações dos vários compostos individuais que ocorrem simultaneamente. Os componentes do Cimento começam-se a hidratar com a introdução da água, originando compostos, sendo os silicatos de cálcio hidratado (CSH), os mais predominantes. Estes formam uma rede coesiva, que aumenta proporcionalmente com o número de hidratos. (Netto, 2006 cit. Carvalho, 2002)

Com base na teoria da percolação, (Netto, 2006 cit. Acker, 1988 apud Faria, 2004), afirmam que esta rede é constituída por uma ligação mecânica entre os grãos, que se encontram numa fase inicial de maneira aleatória e isolada. De seguida, dá-se a formação de subconjuntos contínuos de grãos ligados mecanicamente, denominados de “amas”, que, de seguida, se juntam formando um caminho contínuo. O aparecimento de um caminho contínuo que atravessa o conjunto, pode ser denominado de limiar de percolação, e podemos observar isso na Figura 1.



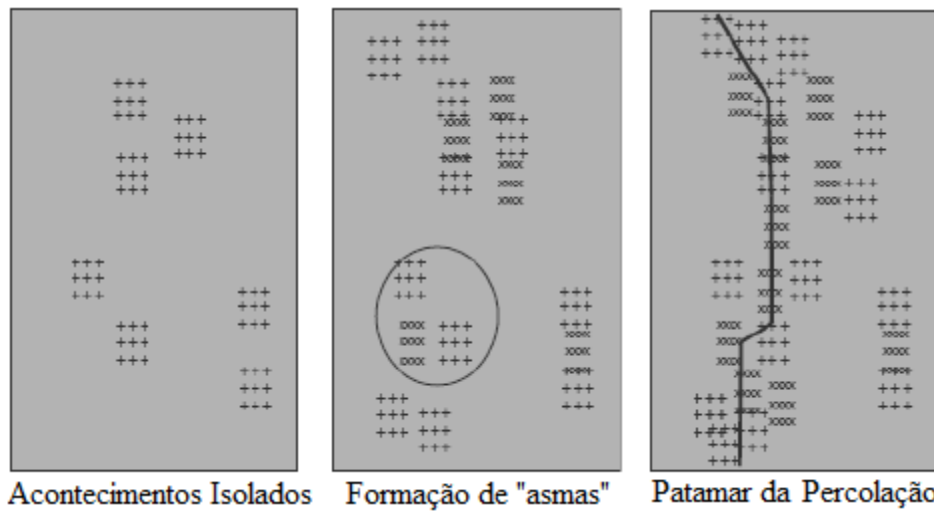


Figura 1- Representação esquemática das noções da teoria da percolação.

Fonte: "Materiais Pozolânicos" Adaptado Netto, 2006 cit. Acker, 1988 apud Faria, 2004. p 24

A evolução das reações de hidratação está diretamente relacionada com a evolução das propriedades do material, módulo de elasticidade, resistência, fluência, retração, etc. As reações de hidratação podem ser divididas em cinco estágios tendo como relação o tempo, e são inerentes a um processo exotérmico. (Netto, 2006 cit. Faria (2004).

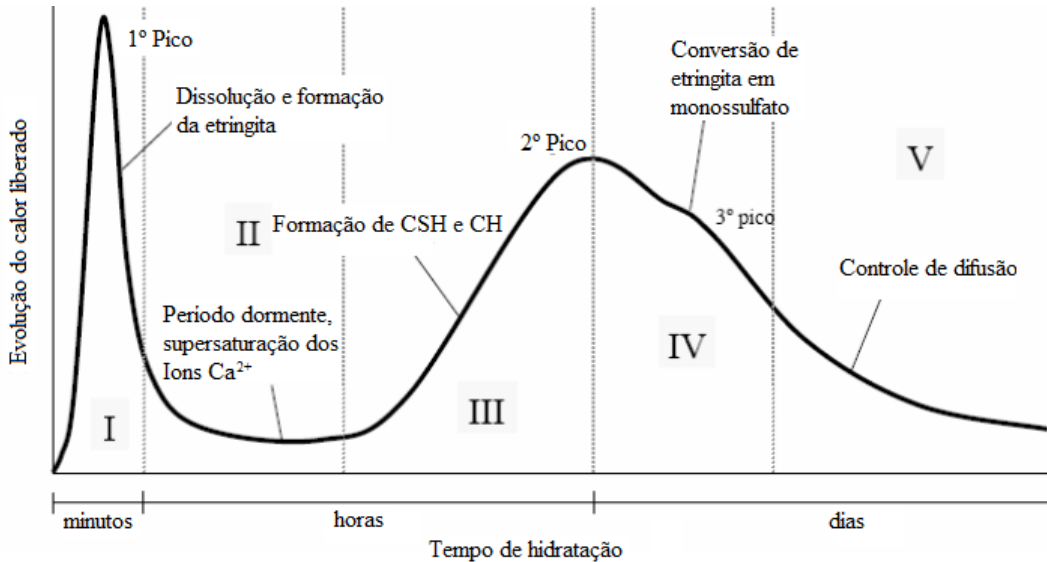


Figura 2- Estágios da hidratação.

Fonte: "Materiais Pozolânicos" Adaptado Netto, 2006 cit. Faria, 2004. p. 25)

O primeiro estágio ocorre nos primeiros instantes (15 a 20 minutos), o segundo estágio entre 2 a 4 horas, seguidamente, III (entre 4 a 8 horas), IV, entre 8 a 12 horas e por fim o V, entre 12 a 24 dias.

No primeiro estágio, a água dissolve o Cimento, originando uma suspensão de iões, entre os quais o  $\text{Al}^{3+}$  reage momentaneamente com o gesso e a água da mistura. Liberta-se, por isso, uma grande quantidade de calor, promovendo o primeiro pico de calor. Quando a concentração é crítica por parte dos iões de cálcio e de hidróxido, a cristalização de Silicato de Cálcio Hidratado (CSH) e de Hidróxido de Cálcio (CH) tem início.

O segundo estágio tem o nome de período dormente ou de indução, e neste período, o Cimento ainda permanece plástico. Verifica-se uma formação contínua da etringita enquanto houver gesso na forma de iões  $\text{SO}_4^{2-}$  na solução. Quando a dissolução dos minerais do Cimento é concluída, verifica-se um aumento da concentração de iões na solução. O hidróxido de cálcio cristaliza a solução e o CSH, desenvolvendo-se na superfície do  $\text{C}_3\text{S}$ , forma uma cobertura. A reação torna-se uma difusão controlada, devido ao aumento de espessura dessa cobertura e do tempo que a água leva a penetrar na mesma. O  $\text{C}_2\text{S}$ , por ser um componente menos reativo, hidrata mais lentamente. Com isso, nota-se uma baixa libertação de calor. O aparecimento do  $\text{SO}_4^{2-}$ , na solução provoca uma instabilidade na camada de etringita causando a sua desintegração e dando o fim a este estágio.

O terceiro estágio é realçado pela retoma vigorosa de reações, devido à concentração crítica de iões. O maior número de reações acontece nesta fase, originando uma forte libertação de calor originando o segundo pico exotérmico. A presa chega ao final e o endurecimento inicia-se.

O estágio IV, é consolidado pela conversão da etringita em monossulfato pela reação com os iões  $\text{Al}^{3+}$  não reagidos. Os restantes iões  $\text{Al}^{3+}$  reagem formando novos hidratos que, em conjunto com os hidratos precipitados dos iões  $\text{Ca}^{2+}$ , formam uma proteção em torno do grão do Cimento, impedindo assim o contacto da água livre com a sua parte não hidratada. Inicia-se assim o último estágio, V, também conhecido como controlo de difusão.

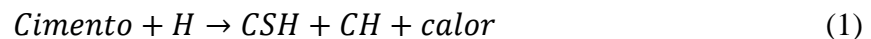
Tendo em conta (Netto, 2006 cit. Peruzzi, 2002), os principais produtos normalmente presentes na pasta de Cimento são os Silicatos de Cálcio Hidratado (CSH), a Portlandita  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou (CH), e os Sulfoaluminatos. As suas quantidades e características principais, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2- Principais Características dos Produtos de hidratação do Cimento Portland.

Produto	Quantidade	Formas	Caraterísticas
Silicato de Cálcio Hidratado (CSH)	50% a 60% do volume de sólidos	Partículas de 1nm a 100nm	Arranjo irregular de lamelas entrelaçadas
			Criam espaços de diferentes formas e tamanhos
			Água capilar
			Água livre - Nenhum efeito na evaporação
			Água absorvida - Ligada por pontes de hidrogênio
Portlandita Ca(OH) <sub>2</sub> ou CH	20% a 25% de volume de sólidos	Cristais grandes prismas hexagonais 1µm	Sua contribuição para a resistência dá-se por força de Van der Walls
Sulfoaluminatos	15% a 20% de volume de sólidos		Desempenham papel menos importante na resitência mecânica
			Vulneráveis ao ataque por sulfatos

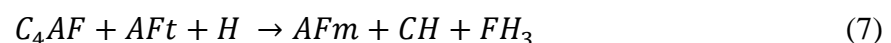
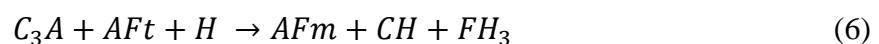
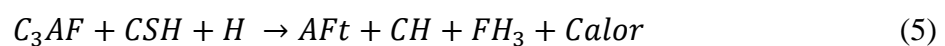
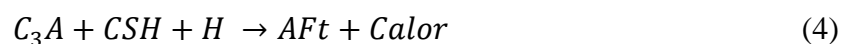
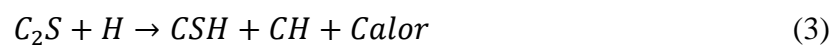
Fonte: “ Materiais Pozolânicos“ Adaptado Netto, 2006 cit. Mehta e Monteiro, 1994 *apud* Peruzzi, 2002. p. 26

Segundo (Netto, 2006 cit. Faria et al. 2004), a reação de hidratação do Cimento, pode ser representada de uma forma simplificada como:



Sendo o CSH os silicatos de cálcio hidratado, o CH, o hidróxido de cálcio ou Portlandita e o H, o H<sub>2</sub>O.

A reação de hidratação compreende a composição das diversas reações abaixo apresentadas:



Sendo AFt a etringita e AFm o monossulfato”

Fonte: “ Materiais Pozolânicos“ por Netto, 2006. p. 27

## 2.2 Pozolanas

As pozolanas são materiais minerais com propriedade cimentícias que podem ser adicionados em betões e em argamassas em quantidades variáveis em relação à massa do Cimento ou como substituto parcial deste. Caracterizam-se por terem na sua constituição grandes quantidades de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), apresentando ainda outras características tais como, elevado teor de fase amorfa e grande superfície específica. À temperatura ambiente e em presença da água, as pozolanas combinam com o hidróxido de cálcio originando um composto que possui estabilidade e propriedades aglomerantes (Coutinho, 1958; NP4220, 1993).

As características físico-químicas das pozolanas podem ser determinadas a partir de vários métodos. Para a determinação da composição química pode-se usar o método de espectroscopia de fluorescência de raios X. Para a determinação da superfície específica pode-se usar os métodos de Blaine ou BET (Brunauer- Emmett- Teller) e o ensaio de Florentin para a determinação do resíduo insolúvel para a quantificação da fase vítrea. Contudo é importante realçar que estes métodos avaliam a potencialidade de um material como potencial pozolana, mas não quantificam a sua reatividade (Pontes, 2011).

A utilização das pozolanas em adições de Cimento proporciona às argamassas e ao betão (Netto, 2006 cit Guedert, 1989 apud Santos, 2006):

- Menor calor de hidratação devido à troca das reações exotérmicas que ocorrem na hidratação do Cimento, por reações atérmicas, reações pozolânicas;
- Melhor resistência ao ataque ácido, devido à estabilização do hidróxido de cálcio natural da reação da hidratação do Cimento e à formação do CSH com menor relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  de menor basicidade;
- Maior durabilidade, que contribui para a inibição da reação álcali-agregado e proporciona uma diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada, diminuindo o ataque do material a substâncias externas como os sulfatos e os cloretos;
- Potencialmente, menor resistência à carbonatação associado ao consumo de hidróxido de cálcio pela reação pozolânica.

Podem-se dividir as pozolanas em três grupos: As pozolanas naturais; as artificiais; e os subprodutos industriais (Coutinho, 1958; NP4220, 1993).

### 2.2.1 Pozolanas Naturais

As pozolanas naturais são materiais de origem vulcânica, formadas pelo rápido arrefecimento e solidificação do magma, fenómeno que ocorre após erupções vulcânicas. Este tipo de pozolana é constituído em grande parte por óxidos de silício reativo e óxidos de alumínio.

Devido a diferentes locais de formação das pozolanas naturais e sob diferentes condições, existe vários tipos de pozolanas naturais com diferentes composições. Na Tabela 3, estão representados vários tipos de pozolanas naturais bem como a sua origem e composição.

Tabela 3- Pozolanas Naturais.

<b>Designação</b>	<b>Origem</b>	<b>Composição</b>
Pozolanas dos açores	Açores, Portugal	Variada dependendo da proveniência; traquitos e limburguitos.
Pozolana de Porto Santo	Porto Santo, Madeira, Portugal	Rochas de tipo basáltico, muito alteradas
Pozolana de Santo Antão	Ilha de Santo Antão, Cabo Verde	Tufo vulcânico, provavelmente Andesítico
Pozolanas Italianas	Itália (Vesúvio, Roma, Nápoles)	Variada dependendo da proveniência
Terra de Santorini	Santorini, Grécia	Obsidianas (riolitos) e tufos provenientes das obsidianas
Pozolanas dos E.U.A	E.U:A	Tufos riolíticos
Trass	Alemanha (Reno)	Tufos traquíticos
Pozolanas das Canárias/Tosca	Ilhas Canárias, Espanha	Variadas desde obsidianas a limburguitos
Pozolana Vólvia	França (Sudoeste)	Tufos traquíticos
Higashi Masuyama	Japão	Pozolanas vítreas de origem vulcânica, contendo minerais argilosos e zeólitos
Areia Vulcânica	Várias	Formadas a partir de rochas vulcânicas, tais como o xisto ou basalto

Fonte: “ Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas” Adaptado Velosa, 2006, p. 7

As pozolanas naturais, na sua grande maioria, possuem carbonatos, argilas e grupos de materiais zeolíticos como materiais de enchimento (Çavdar e Yetgin 2007). Os zeólitos são minerais aluminosilicatados hidratados, que possuem uma estrutura em “gaiola” que origina uma grande superfície de contacto, que proporciona e é determinante na definição da sua reatividade.

### 2.2.2 Pozolanas artificiais

As pozolanas artificiais surgem da instabilidade da sua estrutura interna, conseqüentemente da saída de iões  $\text{OH}^-$  da rede cristalina dos materiais argilosos, devido à ação da temperatura (500-900°C). Este processo aumenta a porosidade da partícula, aumentando assim a sua superfície ativa.

As pozolanas artificiais obtêm-se da calcinação de materiais de natureza natural, sujeitos a condições específicas. Presentemente, este tipo de pozolana usa-se como inibidor da reação alcali-sílica ou como substituto do Cimento.

Na Tabela 4, podemos ver vários tipos deste tipo de pozolana bem como algumas observações referentes a cada um do material.

Tabela 4- Pozolanas artificiais.

Designação	Observações
Argilas Cozidas	Caulinite, illite, esmectite, argilas cozidas a uma temperatura próxima de 900°C e finura inferior a 34µm.
Metacaulino	Calcinação de argila caulínica entre 650°C e 850°C e moagem a uma finura entre 700m <sup>2</sup> /kg e 900m <sup>2</sup> /kg.
Tijolos, telhas moídas	Cozedura a baixa temperatura (menor do que a 950°C) e finura entre 38 µm e 600 µm.
HTI	Porcelana finamente moída.
Gaize cozido	Rocha siliciosa contendo alguma argila cozida a cerca de 950°C.
Moler cozido	Moler (terra diatomácea contendo argila) cozida a cerca de 750°C.
Bauxite cozido	Rocha formada a partir de basalto sujeito a meteorização, cozida entre 250°C e 300°C.
Mínion	Ironstone (rocha com grande conteúdo em óxido de ferro) cozida e moída. Produto utilizado na antiguidade.
Basalto calcinado	Pedra basáltica calcinada e finamente moída.
Cinzas de madeira	Com grande conteúdo em sílica, que é absorvida por muitas plantas durante o seu crescimento.
Cinzas de casca de arroz	Com grande conteúdo em sílica, que é absorvida por muitas plantas durante o seu crescimento. Cozedura entre 500°C e 700°C.
Cinzas de cana de açúcar	Com grande conteúdo em sílica, que é absorvida por muitas plantas durante o seu crescimento.
Vidro moído	Resíduo da indústria do vidro obtido em pó ou moído.
Cinzas volantes	Produto da queima de carvão em centrais termoeléctricas.
Sílica de Fumo	Subproduto do fabrico de metais com ligas de silício e ferro/ silício.

Fonte: “ Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas” Adaptado Velosa, 2006, p. 14

### 2.2.3 Pozolanas derivadas dos subprodutos

A reatividade das pozolanas derivadas dos subprodutos industriais nasce através de um processo semelhante ao das pozolanas artificiais (Coutinho, 1988).

## 2.3 Reação Pozolânica

Várias definições surgem quando se pretende definir a reação pozolânica. (Coutinho, 1958; Massazza, 1993; Callejas, 1958).

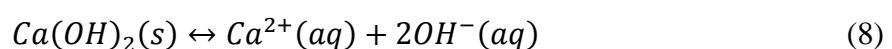
Segundo (Pontes, 2011 cit. Coutinho, 1958), a reatividade pozolânica é a capacidade de um material em se combinar, quer com o hidróxido de cálcio, quer com os constituintes do Cimento hidratado. De acordo com (Pontes, 2011 cit. Massazza, 1993), a reatividade pozolânica, tem por base dois parâmetros, a velocidade a que a reação ocorre e a velocidade a que o hidróxido de cálcio é consumido.

O hidróxido de cálcio é um produto insubstituível para originar a ocorrência da reação pozolânica (Pontes, 2011 cit. Coutinho, 1958 e Callejas, 1958).

A reação pozolânica é uma reação complexa que envolve um meio aquoso com diferentes materiais sólidos. Esta reação depende da estrutura da pozolana, quanto mais amorfa for a sua constituição mais depressa ocorre a reação, formando-se silicato de cálcio hidratado (CSH), silicoaluminatos de cálcio hidratados (CASH) e aluminatos de cálcio hidratado (CAH). (Pontes, 2011 cit. Callejas, 1958).

(Pontes, 2011 cit. Santos, 2005), explica-nos como corre toda esta reação de uma forma prática.

A portlandite ou hidróxido de cálcio no seu estado sólido dissocia-se segundo:



Esta dissociação gera o ião  $OH^-$  que em solução reage com a estrutura dos silicatos da pozolana, separando os seus constituintes principais em Sílica ( $SiO_2$ ) e Alumina ( $Al_2O_3$ ),

tornando-se assim instáveis em termos elétricos. Esta reação de ataque alcalino depende da constituição interna da pozolana, que quanto mais afastado esta constituição estiver da estrutura cristalina, maior será a sua reatividade. Seguidamente, os óxidos vão reagir com o ião  $\text{Ca}^{2+}$  e os grupos hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) originando silicatos e aluminatos de cálcio hidratado que possuem propriedades ligantes.

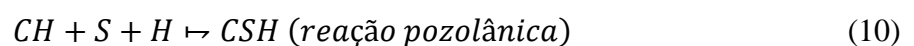
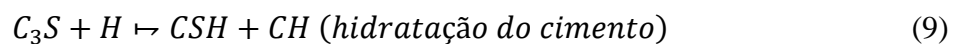
Dependendo depois da natureza da pozolana e, conseqüentemente, da sua composição, vão-se criar diferentes produtos hidratados (Pontes, 2011 cit. Yu, 1999).

Esta reação começa através dos átomos que se encontram à superfície da estrutura da pozolana. Estes átomos não são tão fortes quanto os que se encontram no seu interior, por isso, a reação começa por fora.

Um aspeto importante que se pode enunciar, diz respeito ao Metacaulino empregue em misturas cimentícias que substituindo materiais ricos em sílica, vai diminuir a quantidade de  $\text{SiO}_2$  e aumentar a quantidade de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no sistema. Esta alteração vai originar uma modificação dos produtos de reação. O CSH deixa de ser o único produto da reação e desenvolvem-se novos compostos tais como, a stratlingite ( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ) ou o aluminato de cálcio hidratado (CAH) (Pontes, 2011 cit. Billong, 2011).

Após a dissociação do ião hidroxilo, os produtos de reação formados vão estar relacionados com a composição química dos materiais de partida (Pontes, 2011).

De acordo com (Mehta, 1987), a reação pozolânica, ocorre de uma forma lenta, tal como o desenvolvimento da sua resistência e o calor associado à sua reação. Em contrapartida, a hidratação do CaO do Cimento Portland é rápida, por isso o desenvolvimento da resistência e o calor de hidratação são altos. A hidratação do Cimento produz hidróxido de cálcio e a reação pozolânica consome. Tal fato pode-se verificar nas seguintes reações.



Onde, C= CaO, S= $\text{SiO}_2$ , H=  $\text{H}_2\text{O}$

(Massazza,1993,1998 apud Souza, 2004), defendem que o clínquer e a pozolana apresentam processo de reações muito diferentes. A reação pozolânica apenas tem início entre o dia 7 e



15, após a mistura. A hidratação do Cimento, ao fim de 7 a 15 dias, já está em estado avançado. Um dia depois da mistura, a hidratação do Cimento na presença de pozolanas, envolve unicamente o clínquer, comportando-se as adições minerais como regiões de nucleação para o crescimento de produtos de hidratação. Posteriormente é que se dá o consumo, inicialmente, a partir da superfície externa, estando estas partículas, no princípio, recobertas por camadas de composição diversa, e gradualmente esta camada passa a ser substituída por agulhas de CSH que se desenvolvem perpendicularmente à superfície.

Vários estudos mencionam que a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  consumido nas argamassas com cal e pozolanas é um fator que avalia a reatividade pozolânica. Em diversos métodos pode-se observar esta condição. Como exemplo desses métodos temos o DTA (differential thermal analysis) e o XRD (X-ray diffraction analysis). (Moropoulou; Bakolas; Aggelakopoulou e Varela, 2004).

Segundo (Rojas, 2006), o tamanho das partículas de CSH está relacionado com a força da ligação que ocorre entre estas partículas. Quanto mais pequenas estas partículas maior a sua força de ligação. Estas partículas, expostas a baixas temperaturas, desenvolvem baixas resistências comparativamente quando à sua formação, se realizar na face amorfa. A reação pozolânica, quando bem realizada, geralmente produz redução da porosidade.

A velocidade da reação entre a pozolana e a cal depende da quantidade de sílica solúvel e depende da sua mineralogia. A quantidade de sílica solúvel nas pozolanas, tal como o seu grau de finura, influenciam a escolha das composições das argamassas. Um compósito, com uma grande quantidade de materiais pozolânicos, não implica, por si só, melhores compósitos. (Azevedo,2002; Gibbs, 1997)

A utilização de pozolanas, dependendo da sua natureza, pode aumentar a densidade e resistência das argamassas e diminuir a porosidade (Azevedo, 2002). Papayianni, verificou que as condições de cura também são decisivas para a porosidade.

### **2.3.1 Fatores que influenciam a atividade pozolânica**

Vários fatores influenciam a reatividade pozolânica, Massazza abordou este tema. Segundo (Pontes, 2011 cit. Massazza, 1993), os principais fatores que influenciam a atividade

pozolânica são: A natureza das fases ativas; a percentagem das fases ativas nas pozolanas; a percentagem de  $\text{SiO}_2$  presente nas fases ativas; a razão pozolana/cal presente na mistura; a superfície específica e, por último, a temperatura.

Relativamente a cada um destes tópicos:

- A natureza das fases ativas – Os diferentes tipos de pozolanas reagem de maneira diferente. Massazza exemplifica referindo que a herschelite e a analcime são minerais zeolíticos embora a herschelite seja mais reativa que a analcime.
- A percentagem das fases ativas nas pozolanas, faz com que a reação se realize em maior escala quanto mais fases ativas tiver a pozolana.
- A percentagem de  $\text{SiO}_2$  presente nas fases ativas – Normalmente, a percentagem de  $\text{SiO}_2$  presente nas fases ativas das pozolanas está compreendida entre 45 a 85%, e vai influenciar a percentagem de cal consumida, embora outros compostos tenham também importância como é o caso da alumina.
- A razão pozolana/cal presente na mistura – Trabalhos realizados verificaram que para uma diminuição da percentagem cal-pozolana, a percentagem de cal consumida aumenta. Como anteriormente dito, pozolanas mais reativas consomem mais cal que as menos reativas.
- A superfície específica – Verificou-se que a curto prazo a reatividade está mais dependente da superfície específica da pozolana. Em contrapartida, a longo prazo a reatividade está mais dependente da composição química e mineralógica das pozolanas. Alguns estudos referem também que a velocidade da reação pozolânica é proporcional ao quadrado da superfície específica.
- Temperatura – A temperatura aumenta a velocidade da reação cal/pozolana. Contudo, não modifica as diferenças de comportamento devido às diferentes naturezas da pozolana.

Entre 50 a 90°C o consumo de cal é muito rápido (24 h, aproximadamente), mas tal comportamento não se apresenta linear. Tal afirmação é comprovada pelo facto de aos 70°C o consumo de cal ser inferior ao correspondente à temperatura de 60°C.

### **2.3.2 Reatividade pozolânica do Metacaulino e das Cinzas volantes**

Um estudo acerca da reatividade pozolânica tem particular interesse, na avaliação da pozolana, segundo dois critérios: A velocidade a que ocorre a reação e a velocidade a que o hidróxido de cálcio é consumido. Esta informação pode explicar a razão inerente às propriedades adquiridas pela matriz cimentícia contendo pozolanas.

Velosa (2006) realizou um trabalho de investigação sobre “Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas”. Um dos seus objetivos foi medir a reatividade pozolânica dos materiais utilizados. No seu trabalho experimental para medir a reatividade e proceder a comparações entre as diversas pozolanas, Velosa, utilizou diversas técnicas de ensaio.

Os ensaios no ponto 2.4.2 abordados são:

- Caderno de Encargos para o Fornecimento e Receção de Pozolanas/RBLH;
- ASTM C593-95;
- Ensaio de condutividade.

#### Propriedades do MCA (Metacaulino de Alvarães), MCI (Metacaulino Industrial) e das CV (Cinzas volantes)

O materiais usados por Velosa, na sua campanha experimentar são: MCA (Metacaulino de Alvarães), MCI (Metacaulino Industrial) e das CV (Cinzas volantes)

Estas pozolanas têm as seguintes propriedades:

Tabela 5- Densidade e massa volúmica aparente.

Material	Densidade (g/dm <sup>3</sup> )	Massa Volúmica Aparente (g/dm <sup>3</sup> )
MCA	2530	592
MCI	2640	340
CV	2490	858

Fonte: “Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas”. Adaptado Velosa, 2006. p. 135

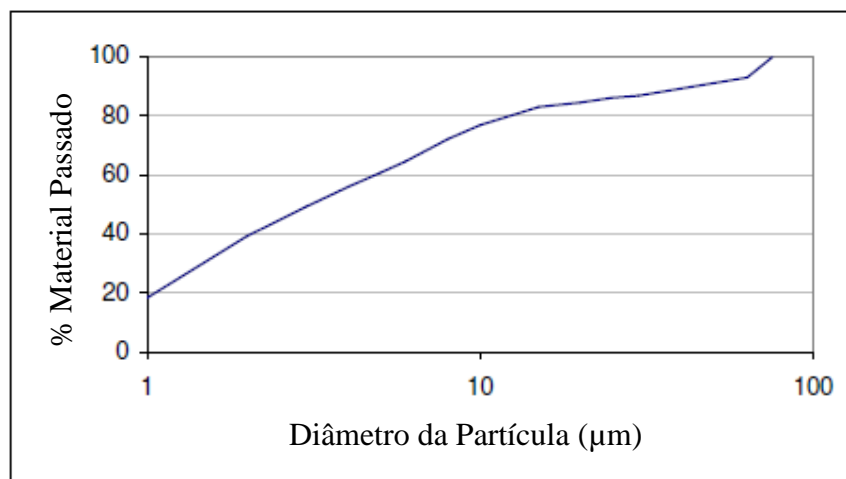


Figura 3- Análise Granulométrica do MCA

Fonte: “Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas”. Adaptado Velosa, 2006. p. 137

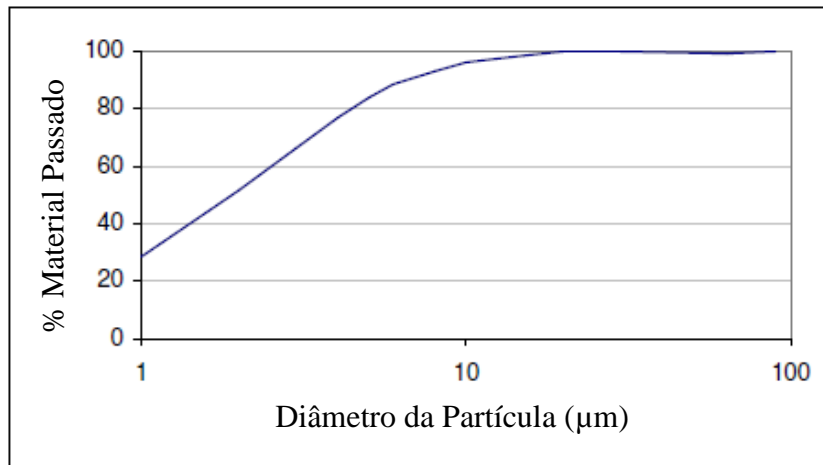


Figura 4- Análise Granulométrica do MCI

Fonte: “Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas”. Adaptado Velosa, 2006. p. 137

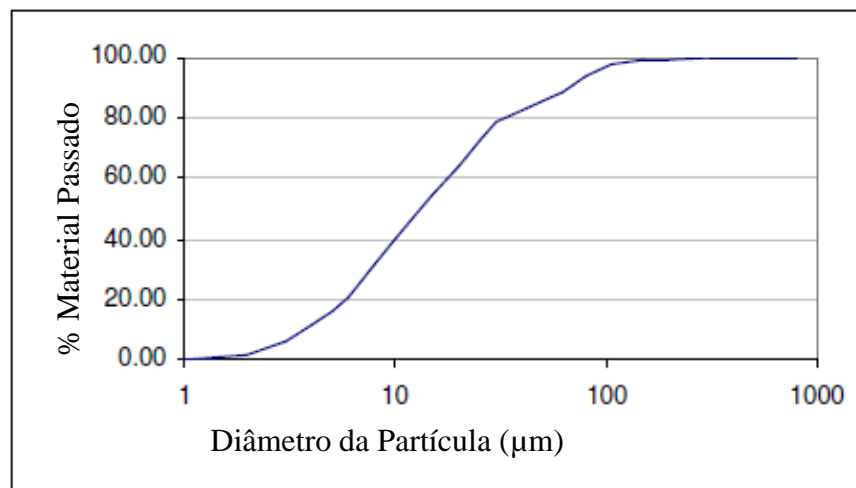


Figura 5- Análise Granulométrica das CV

Fonte: “Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas”. Adaptado Velosa, 2006. p. 137

Tabela 6- Superfície Específica Blaine.

Material	Superfície Específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
MCA	23460
MCI	29330
CV	2500

Fonte: “Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas”. Adaptado Velosa, 2006. p. 139

Caderno de Encargos para o Fornecimento e Receção de Pozolanas/RBLH.

De acordo com Velosa e regendo-se por o “Caderno de Encargos para o Fornecimento e Receção de Pozolanas”, documento anexo do “Regulamento de Betões e Ligantes Hidráulicos”, classifica as pozolanas segundo a sua reatividade como Pozolanas do tipo I (pozolanas de alta reatividade) e Pozolanas do tipo II (pozolanas fracas).

Na Tabela 7 estão referidos os requisitos para esta classificação.

Tabela 7- Classificação de pozolanas segundo o Caderno de Encargos para o Fornecimento e Receção de Pozolanas.

	<b>Idade</b>	<b>Pozolana do tipo I</b>	<b>Pozolana do tipo II</b>
Superfície Especifica		3000 cm <sup>2</sup> /g	2000 cm <sup>2</sup> /g
Resistência à flexão (RF)	7 dias	1 MPa	
	28 dias	2 MPa	1 MPa
Resistência à compressão (RC)	7 dias	2 MPa	
	28 dias	6 MPa	3 MPa

Fonte: “Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas”. Adaptado Velosa, 2006 cit. Classificação de pozolanas segundo o Caderno de Encargos para o Fornecimento e Receção de Pozolanas.

Para este ensaio os provetes têm dimensão de 40mm x 40 mm x 160mm e são moldados a partir de uma mistura de 250g de pozolana, 750g de cal aérea, com a quantidade de água determinada com recurso à sonda de consistência. Para o seu processo de cura, nas primeiras 72h, os provetes são mantidos nos moldes cobertos com chapa metálica, em local com 20°C±1°C e humidade relativa de 95%. Após desmoldagem foram conservados em água, mantendo a sua temperatura constante.

Relativamente aos resultados obtidos por Velosa (2006), expressos na Tabela 8, e de acordo com este ensaio, ambos os Metacaulinos apresentam melhores propriedades pozolânicas que as Cinzas volantes. Contudo, ambas as pozolanas, de acordo com este ensaio, tem reatividade demasiada baixa para serem considerados materiais pozolânicos.

Tabela 8- Resistência à flexão e à compressão, através do ensaio RBLH

Material	RF 7 dias	RC 7 dias	RF 28 dias	RC 28 dias
MCA	-	-	0,65	2,36
MCI	0,34	1,01	0,46	2,68
CV	-	-	0,35	1,02

Fonte: “Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas”. Adaptado Velosa, 2006. p. 152

### ASTM C593-95

A norma ASTM C593-95 estabelece os seguintes requisitos a serem cumpridos por pozolanas utilizadas em argamassas de cal.

Tabela 9- Requisitos para pozolanas segundo a ASTM C593-95

Determinação	Máximo	Mínimo
Fração Solúvel	10%	-
Retidos 600µm	2%	-
Retidos 75µm	30%	-
Resistência à compressão 7 dias	-	6 MPa
Resistência à compressão 28 dias	-	6 MPa

Fonte: “Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas”. Adaptado Velosa, 2006 cit. ASTM C593-95 p. 150.

Para o ensaio ASTM C593-95, são preparados provetes cúbicos com 50mm de aresta, com uma mistura de 180g de cal aérea hidratada, 360g de pozolana e 1480g de areia normalizada, para, à posteriori, verificar a sua resistência à compressão. O processo de cura teve por base a colocação dos provetes numa câmara com vapor a  $54\pm 2^{\circ}\text{C}$  durante 7 dias. Após desmoldagem foram mantidos à temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e 95 a 100% de humidade relativa até a data de ensaio.

Os resultados obtidos referentes ao ensaio ASTM C593-95 indicados na Tabela 10, evidencia que o MCI é a única pozolana que cumpre os requisitos mínimos de resistência aos 7 e 28 dias, apresentando as CV, resultados especialmente baixos.

Tabela 10- Resistência a compressão segundo ASTM C593-95

Material	RC 7 dias	RC 28 dias
MCA	4,47	3,84
MCI	11,22	9,8
CV	1,54	1,4

Fonte: “Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas”. Adaptado Velosa, 2006 cit. ASTM C593-95 p. 153

### Ensaio de condutividade

O ensaio de condutividade efetuado pela autora, foi baseado na metodologia descrita por Luxán (1989), tendo sido utilizados 5g de pozolana e uma solução saturada em  $\text{Ca(OH)}_2$ . O ensaio foi realizado à temperatura de 40°C e teve como objetivo medir a condutividade inicial de uma solução saturada de hidróxido de cálcio e a sua variação durante 120s após adição do material pozolânico. A redução da condutividade com a fixação de iões por reação com os materiais pozolânicos dá origem à classificação da atividade pozolânica de acordo com a Tabela 11.

Tabela 11- Avaliação da atividade pozolânica por medição da condutividade

Classificação do material	Varição de condutividade (mS/cm)
Não pozolânico (N.P)	< 0,4
Pozolanicidade variável (P.V)	0,4 a 1,2
Boa Pozolanicidade (B.P)	> 1,2

Fonte: “Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas”. Adaptado Velosa, 2006 cit. (125) p. 151.

De acordo com este ensaio, produzido pela autora referida, o único material, tendo em conta a variação da condutividade, classificado como Pozolana, foi o MCI, sendo este classificado como tendo Pozolanicidade Variável (P.V), conclusões obtidas através da Tabela 12.

Tabela 12- Variação da condutividade

Material	$\Delta\text{ms/cm}$	Classificação
MCA	0,3	N.P
MCI	0,4	P.V
CV	0,2	N.P

Fonte: Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas”. Adaptado Velosa, 2006 cit. (125) p. 154



A atividade pozolânica pode ser classificada em relação a propriedades físicas, químicas e mecânicas por diversos métodos que muitas vezes não se correlacionam. Por exemplo, o efeito das adições minerais em Cimento é avaliado com base no consumo da cal. Porém, o progresso da hidratação destes Cimentos não deve ser avaliado unicamente em termos da quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Em pastas de Cimento, a portlandita é consumida em decorrência de, pelo menos, três fenômenos distintos:

-Aceleração da hidrólise dos silicatos de cálcio do clínquer;

-Reação pozolânica e modificação na composição dos produtos de hidratação.

Deve-se, no entanto, ainda considerar que nos Cimentos com adições, a formação de CSH devido à hidrólise da cal é diferente do CSH obtido da hidratação dos componentes  $\text{C}_2\text{S}$  e  $\text{C}_3\text{S}$  do clínquer, principalmente devido às diferentes condições de formação (Massazza,1993,1998 apud Souza, 2004). Tendo em conta estes aspectos, estes resultados devem ser analisados com prudência.

### **2.3.3 Reatividade pozolânica do Metacaulino e das Cinzas volantes e sua evolução com o tempo.**

Pontos (2011), efetuou vários ensaios para avaliar a atividade das pozolanas, utilizadas no seu procedimento experimental. A avaliação dos resultados de um desses ensaios proporcionou resultados interessantes que podem proporcionar uma avaliação da atividade pozolânica das Cinzas volantes e do Metacaulino em função do tempo.

O ensaio em questão foi o ensaio do índice de atividade.

#### Ensaio de índice de atividade

Para a realização deste ensaio, Pontes (2011), utilizou os seguintes materiais e procedimento de ensaio:

- Materiais: Cimento Portland do tipo CEMI 42,5R; Materiais pozolânicos a testar; Água destilada Areia de referência AFNOR.

- Procedimento de ensaio:

- Pesou-se o ligante (337,5g), o material a avaliar (112,5g), a areia (1350g) e mediu-se 225ml de água destilada para cada amassadura.

- De acordo com a norma NP EN 450-1, os dois provetes, originários de cada amassadura foram testados à flexão e posteriormente à compressão.

#### Propriedades dos materiais em estudo:

As propriedades dos três diferentes tipos de Metacaulinos, usados por Pontes (2011), na sua campanha experimental e designados por MK1; MK2, MK3, bem como as propriedades referentes as Cinzas volantes (CV), estão indicadas na Tabela 13.

Tabela 13- Composição química (% em massa) e superfície específica (Blaine).

Designação	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO	Lol	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
MK1	55,00	39,00	1,8	0,6	0,6	1	1	1,5	1	33760
MK2	53,25	31,96	7,14	3,41	0,16	0,2	0,67	3,22	-	6130
MK3	52,17	44,50	0,45	0,01	-	-	0,15	1,42	1,42	9310
CV	53,22	23,20	5,85	5,36	1,63	0,44	1,42	-	5,16	4090

Fonte: “Reactividade de Pozolanas para Argamassas e Betões” Adaptado Pontes, 2011. p. 29

A Tabela 14, expressa os resultados do ensaio do Índice de atividade.

Tabela 14- Resultados do Índice de Atividade de acordo com a NP EN 450-1

Designação	28 dias (%)	90 dias (%)	Variação 28-90 (dias)
MK1	83,9	86,9	3
MK2	78,7	85,8	7,06
MK3	63,1	76,1	12,98
CV	80,8	103,2	22,4

Fonte: “Reactividade de Pozolanas para Argamassas e Betões” Adaptado Pontes, 2011. p. 47

Os resultados do Índice de atividade (IA) aos 28 dias mostram que todos estes materiais apresentaram valores de resistência à compressão inferiores à argamassa padrão, com exceção das CV, aos 90 dias de idade. Porém, segundo a norma NP EN 450-1 (IPQ, 2005), são considerados materiais pozolânicos, os materiais que apresentam aos 28 dias valores de IA superior a 75%, e 85% aos 90 dias.

Através de uma análise da Tabela 14, conclui-se que os Metacaulinos, MK1 e o MK2, tal como as Cinzas volantes CV, são materiais pozolânicos cumprindo estes valores estipulados.

A Figura 6, permite-nos efetuar uma análise interessante, correlacionando a variação do IA entre os 28 e 90 dias. Esta variação demonstra que a atividade das Cinzas volantes e do Metacaulino dá-se com maior intensidade em idades mais avançadas, com especial destaque para as Cinzas volantes, apresentando estas uma variação no seu índice de atividade próximo dos 25%.

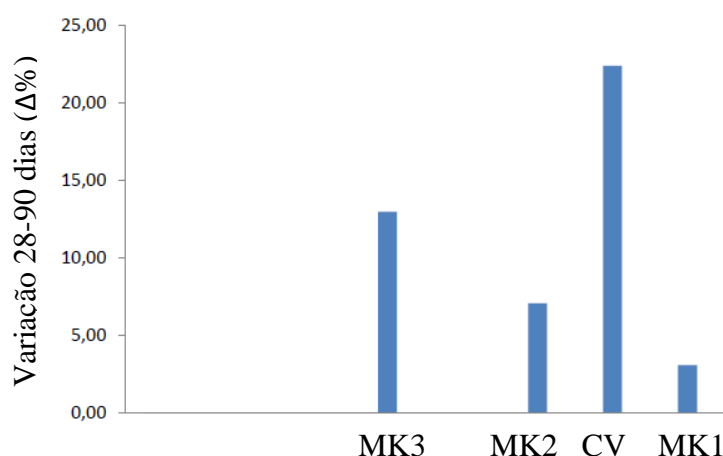


Figura 6- Variação do IA entre os 28 e os 90 dias

Fonte: “Reactividade de Pozolanas para Argamassas e Betões” Adaptado Pontes, 2011. p. 48

## 2.4 Influência dos minerais e da cal em misturas cimentícias

### 2.4.1 Betão de elevado volume de Cinzas volantes

Este tipo de betão, segundo (Camões, 2011 cit. Malhotra, 2002), é caracterizado por ter uma percentagem mínima de substituição de Cimento por Cinzas volantes, compreendida entre 50 a 60%. Esta percentagem, é percentagem em massa relativa ao total de materiais cimentícios. Outras características estão presentes neste tipo de betão, tais como: baixo teor de água, normalmente inferior a 130 l/m<sup>3</sup>; teor de Cimento inferior a 200 kg/m<sup>3</sup> com valor normalmente perto dos 150 kg/m<sup>3</sup>; e por ultimo, relação água/ligante, normalmente inferior a 0,35.

Betões com estas características, são dotados de uma resistência mecânica adequada, em idades jovens (idades iniciais), mas apresentam, sobretudo, resistências mecânicas melhoradas a longo prazo (Camões, 2011 cit. Malhotra e Ramezianpour, 1994).

Contudo, estes tipos de betões podem desenvolver resistências mecânicas reduzidas em idades compreendidas entre os 3 a 7 dias. (Camões, 2011 cit. Gillies, 2001).

Devido a este inconveniente, de poderem apresentar resistências mecânicas reduzidas em idades jovens, a combinação mineral que se pode realizar na constituição dos betões é importante e deve ser encorajada, pois pode trazer vários benefícios finais, dos quais poderemos beneficiar.

Em (Camões, 2011), usando  $160 \text{ Kg/m}^3$  de Cimento e  $400 \text{ kg/m}^3$  de ligante, entre outras características, verifica-se que aos 28 dias este betão apresenta uma resistência à compressão de aproximadamente 35 MPa.

A Figura 7 foi obtida por intermédio de um trabalho experimental realizado por (Camões, 2011). A Tabela 15 apresenta os três tipos de betões em estudo, bem como a sua constituição. A Figura 7 mostra-nos a evolução da resistência à compressão em cubos em função do tempo.

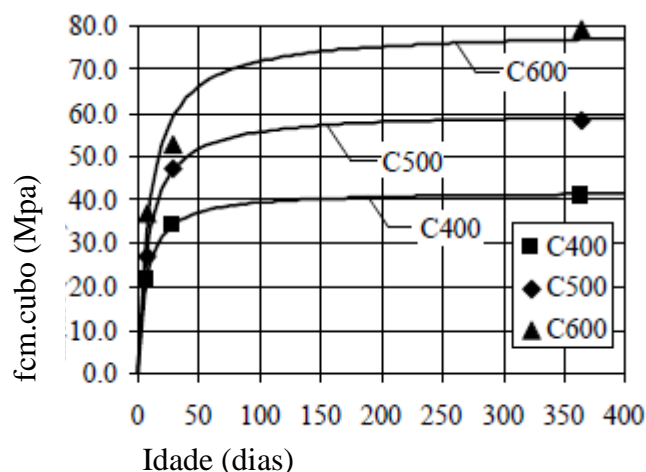


Figura 7- Resistência à compressão ( $f_{cm, cubo}$ )

Fonte: “Betão eco-eficiente com reduzido teor de Cimento” Adaptado Camões, 2011, p. 4

Tabela 15- Composições realizadas por Camões, 2011.

Composição	A/L	C (Kg/m <sup>3</sup> )	CV (Kg/m <sup>3</sup> )	Areia (Kg/m <sup>3</sup> )	Brita (Kg/m <sup>3</sup> )
C400	0,27	160	240	780	1170
C500	0,23	200	300	731	1097
C600	0,2	240	360	685	1027

Fonte: “Betão eco-eficiente com reduzido teor de Cimento” Adaptado Camões, 2011, p. 4

Várias propriedades podem ser atribuídas a este tipo de betão tais como: Aparentam ser altamente duráveis, com reduzida absorção capilar, elevada resistência a penetração de cloretos, baixo calor de hidratação e reduzida retração por secagem (Camões, 2011 cit. Burden, 2006; Camões, 2006; Malhotra e Mehta, 2002). Grandes volumes de Cinzas volantes, reduzem a exigência de água, melhoram a trabalhabilidade, minimizam a fissuração associada a retração térmica e à da secagem, aumentam a resistência à corrosão das armaduras ao ataque por sulfatos. E, por último, diminuem a expansão devida à reacção álcalis-agregado. (Camões, 2011 cit. Mehta, 2004).

Em contrapartida, é expectável que a profundidade de carbonatação aumente com o acréscimo de Cinzas volantes devido ao consumo de hidróxido de cálcio na reacção pozolânica. Em contrapartida a eventual redução da porosidade devido ao refinamento dos poros pode compensar este fenómeno (Camões, 2011 cit. Burden, 2006, Joshi e Lohtia 1997).

## 2.4.2 Betão com Cinzas volantes e Metacaulino

Com objetivo de caracterizar este tipo de betão, (Camões, 2011) desenvolveu um programa experimental com o objetivo de caracterizar o desempenho desta mistura ternária.

Neste ponto, vamos apenas referir as conclusões obtidas relativamente à resistência a compressão (EN 196-1:2006), Espalhamento (EN 1015-3:2004), e durabilidade (absorção por capilaridade (EN 1015-18:2002))

Os materiais nesta experimental e suas propriedades são: Cimento (C) (CEMII/32,5BL), Metacaulino (MtK, resultante da cozedura a cerca de 750/800°C de caulino extraído em Barqueiros) e as CV utilizadas, são provenientes da central termoelétrica do Pego.

Na Tabela 16, estão representadas todas as amostras realizadas para a incorporação deste estudo, onde “L=C+CV+MtK” é o ligante e “W” a água.

Tabela 16- Composições realizadas.

Mistura	Nome	Materiais						
		L (kg/m <sup>3</sup> )	C (%)	MtK (%)	CV (%)	M (kg)	W/L	SP (%L)
I	Padrão	484	100	0	0	1457,9	0,55	0
II	10% MtK	484	90	10	0	1449,1	0,55	1,5
III	20% CV	484	80	0	20	1422,8	0,55	0
IV	40% CV	484	60	0	40	1387,6	0,55	0
V	60% CV	484	40	0	60	1352,5	0,55	0
VI	10% MtK+ 20% CV	484	70	10	20	1414	0,55	0
VII	10% MtK+ 40% CV	484	50	10	40	1378,8	0,55	0,4
VIII	10% MtK+ 60% CV	484	30	10	60	1343,6	0,55	1,5

Fonte: “Betão eco–eficiente com reduzido teor de Cimento” por Camões, 2011, p.5

Com base na trabalhabilidade, no estudo em questão houve dificuldade no processo de mistura tendo-se utilizado um Superplastificante em algumas dessas amassaduras.

Concluiu-se “Em pequenas percentagens de substituição do Cimento por adição de MtK(10%) a trabalhabilidade não será tão importante ou crítica, mas à medida que esta quantidade aumenta poderemos ver comprometida a amassadura. Pelo contrário, a incorporação de CV origina pastas de trabalhabilidade crescente em função da quantidade de CV. Na prática, poderá dizer-se que estas duas adições são complementares, pois as CV proporcionam um efeito mitigador desta grande desvantagem da utilização do MtK (trabalhabilidade).” Fonte: “Betão eco–eficiente com reduzido teor de Cimento” por Camões, 2011. P. 6

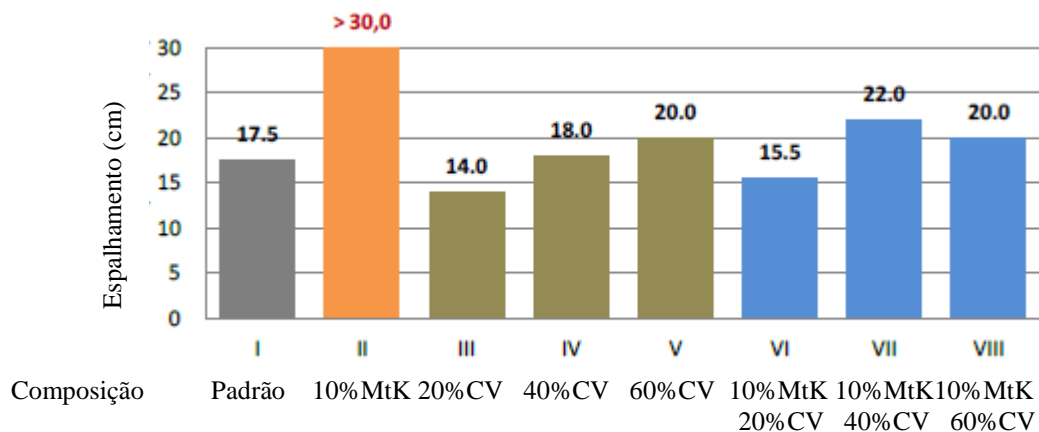


Figura 8- Trabalhabilidade, espalhamento.

Fonte: “Betão eco–eficiente com reduzido teor de Cimento” por Camões, 2011,p.6

Relativamente à resistência à compressão, concluiu-se que o Metacaulino, potenciou as resistências a compressão em todas as idades como podemos ver no seguinte gráfico. Porque o Metacaulino reage muito mais rápido do que as Cinzas volantes com o hidróxido de cálcio o que conduz a maiores resistências iniciais.

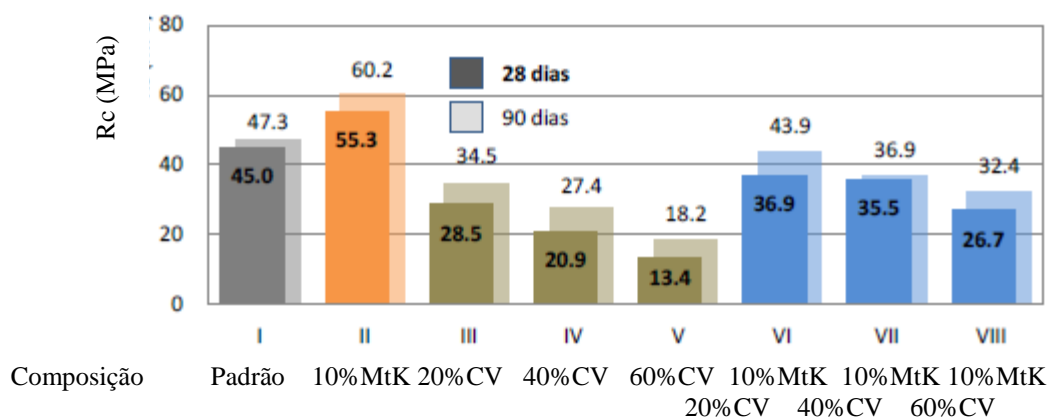


Figura 9- Resistência a compressão aos 28 e 90 dias.

Fonte: “Betão Eco-Eficiente com reduzido teor de Cimento” Adaptado Camões, 2011, p.6

O melhoramento destas resistências, eventualmente, pode dever-se ao facto de a introdução do Metacaulino acelerar as reações com as Cinzas volantes e por o Metacaulino aumentar a compacidade por ser mais fino e reativo.

Por fim, o coeficiente de absorção capilar aos 28 dias de idade, a Mistura Padrão possuiu valores superiores às restantes misturas, como já era esperado pelo autor deste estudo. Concluiu-se, também, que com o acréscimo de Cinzas volantes, o desempenho dos betões vão diminuindo relativamente à absorção capilar. Devido ao Metacaulino ser um material mais fino e reativo que as Cinzas volantes, desempenha bons efeitos neste aspeto, por isso, as composições ternárias apresentaram melhores resultados resultando um betão mais eficiente.

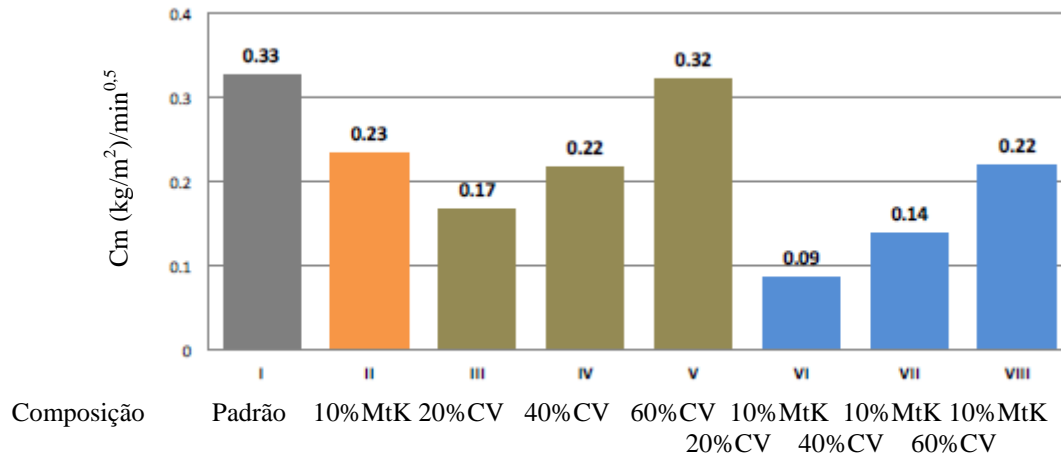


Figura 10- Coeficiente de absorção capilar aos 28 dias.

Fonte: “Betão Eco–Eficiente com reduzido teor de Cimento” Adaptado Camões, 2011, p.8

### 2.4.3 Hidróxido de cálcio em misturas cimentícias.

O estudo realizado por Mira et al. (2002) descrito por Filho, J., H., (2002), foi realizado para pesquisar as propriedades de durabilidade do betão advindas da adição de cal hidratada.

Neste tópico, iremos abordar a pesquisa do autor relativamente à avaliação das amostras realizadas à resistência, à compressão, ao exame micro estrutural através da difração de raio-X e análise termogravimétrica e, por fim, relativamente à análise da porosidade.

Este estudo teve por base betões com relação água/ligante de 0,61 com conteúdo de materiais cimentícios de 320 kg/m<sup>3</sup>, onde a massa cimentícia era constituída Cimento Portland comum, pozolânico e uma composição de 80% de Cimento Portland comum e 20% de Cinzas volantes.

A cal hidratada foi adicionada em massa, nas quantidades que variavam entre 0 a 25%. A cal hidratada aplicada neste estudo possuía um teor de óxido de cálcio (CaO) superior a 98%.

Analisando a resistência a compressão, o betão com Cimento Portland comum obteve variações significativas com incorporação de teores de cal hidratada, comparativamente com o betão de referência (0% de cal hidratada), por vezes com valores mais altos, por vezes com valores mais baixos. A composição que se destacou foi a que continha 25% de cal, que



apresentou maior valor de resistência aos 90 dias, mantendo esta posição de liderança até aos 360 dias, data dos últimos ensaios.

No betão com Cimento Portland pozolânico ou com mistura de cinzas, a adição de cal apresentou pequenas melhorias na resistência a compressão, sobretudo nas primeiras idades, independentemente da percentagem de cal hidratada empregue.

A análise micro estrutural, por intermédio da difração raio-x e análise termogravimétrica, foi realizada interrompendo a hidratação dos provetes aos 3, 28 e 90 dias.

Estes ensaios não verificaram a ocorrência de novos produtos de reação. Nas amostras que utilizaram cal hidratada, nos diferentes materiais cimentícios empregados, comparativamente com os produtos que se formam na hidratação do Cimento.

Contudo, os ensaios revelaram elevados conteúdos de hidróxido de cálcio nas pastas com adição de cal hidratada e altos conteúdos de silicato de cálcio hidratado (CSH) nas pastas com incorporação de materiais pozolânicos. Este produto (CSH), formado na presença de cal hidratada, de uma forma mais eficaz explica o aumento da resistência à compressão.

Por fim, relativamente à porosidade, a sua análise, em função do teor de adição de cal hidratada, foi realizada aos 28 dias de idade do betão, apresentando-se um aumento da porosidade no betão com Cimento Portland comum com crescente incorporação de cal, valores opostos foram verificados nos betões que contêm materiais pozolânicos, na qual verificou-se um decréscimo na porosidade com o aumento da inserção de cal hidratada.

A justificação destes resultados, deve-se a aceleração da atividade pozolânica na presença da cal, resultando em maiores quantidades de CSH e, conseqüentemente, um refinamento dos poros diminuindo a porosidade, e assim, melhorando a durabilidade, fator importante nos dias de hoje.

Porém, a menor porosidade aos 28 dias, foi obtida no betão de referência sem cal, embora espera-se que a mistura com 80% de Cimento e 20% de cinzas apresentasse menor porosidade em virtude da adição de cal mas em idades maiores de ensaio, onde a atividade pozolânica já se deu em maior escala.

De uma forma resumida, podemos ver na dissertação de Filho, J., H., (2002), mais alguns dados sobre a aplicação da cal hidráulica em betões. Para este trabalho experimental realizam-

-se betões com adições minerais e foi aplicada cal hidráulica em teores de 15 a 18% sobre a massa de materiais cimentícios. As adições minerais que foram utilizadas foram as Cinzas volantes, as cinzas de casca de arroz e/ou escória, perfazendo misturas binárias ou ternárias, onde a substituição do Cimento, por estes minerais esteve entre 50 a 90%, em massa. Foram realizadas três relações água/ligante (0,35; 0,45 e 0,55). Os ensaios realizados mais importantes, tendo em conta a natureza desta dissertação, foram a resistência à compressão e a Absorção de Água por Imersão. A comparação de resultados, teve como base a comparação dos valores obtidos nestes ensaios por betões com e sem cal, e num betão padrão sem adição mineral.

Em relação a resistência à compressão a utilização de adições, de um modo geral, resultou um decréscimo da resistência relativamente ao betão padrão sem adições. Em betões com cal, obteve-se valores superiores aos betões similares sem cal.

Para a absorção capilar, o betão com Cimento Portland, tendo relação A/L de 0,35, foi superado pelos betões com escória com e sem adição de cal, pela mistura ternária com Cinzas volantes, escória e cal e pela mistura binária com cinza de casca de arroz e cal hidratada. Para a relação A/L de 0,45, o betão que apresentou menor coeficiente de absorção capilar foi o betão de referência, para a relação 0,55 de A/L, o betão referencial apenas foi superado pela mistura de 70% de escória e cal hidratada.

Nas seguintes Tabelas podemos observar as diversas composições dos betões utilizados neste estudo bem como algumas dos seus resultados, de modo a dar uma ideia mais prática deste estudo experimental enunciado.

Tabela 17- Legenda das misturas aglomerantes em estudo.

<b>Sigla</b>	<b>Descrição</b>
R	Cimento Portland ARI (referência)
VC	Cinza Volante e Cal Hidratada
V	Cinza Volante e Cal Hidratada
AC	Cinza de Casca de Arroz e Cal Hidratada
A	Cinza de Casca de Arroz
EC	Escória Granulada de Alto Forno e Cal Hidratada
E	Escória Granulada de Alto Forno
VAC	Cinza Volante, Cinza Casca de Arroz e Cal Hidratada
VA	Cinza Volante e Cinza Casca de Arroz
VEC	Cinza Volante, Escória Granulada de Alto Forno e Cal Hidratada
VE	Cinza Volante e Escória Granulada de Alto Forno

Fonte: “Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais” por Filho, 2002, p. 63

Tabela 18- Denominação e teor de adição mineral por mistura aglomerante investigada.

<b>Traço</b>	<b>Composição do Ligante (%)</b>				<b>Adição (%)</b>	
	<b>C</b>	<b>CV</b>	<b>C. Casca de Arroz</b>	<b>Escória</b>	<b>Cal Hidratada</b>	
R	100	-	-	-	-	
VC	50	50	-	-	15	
V	50	50	-	-	-	
AC	50	-	50	-	18	
A	50	-	50	-	-	
EC	30	-	-	70	15	
E	30	-	-	70	-	
VAC	30	50	20	-	18	
VA	30	50	20	--	-	
VEC	10	20	-	70	18	
VE	10	20	-	70	-	

Fonte: “Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais” por Filho, 2002, p.63

Tabela 19- Quantidades de materiais empregados por m<sup>3</sup> de betão.

Traço	Relação W/L	Unidades dos constituintes sólidos (kg/m <sup>3</sup> ); Água (l/m <sup>3</sup> )							
		C	CV	C. Casca de Arroz	Escória	Cal Hidratada	Areia	Adjuvante	Água
R1	0,35	540	-	-	-	-	605	0,5	188,5
R2	0,45	393	-	-	-	-	753	-	176,9
R3	0,55	309	-	-	-	-	837	-	170
VC1	0,35	270	270	270	-	-	514	19,5	169,5
VC2	0,45	197	197	197	-	-	686	8,5	168,4
VC3	0,55	155	155	155	-	-	784	4,6	165,4
V1	0,35	270	270	270	-	-	514	5,1	183,9
V2	0,45	197	197	197	-	-	686	2,4	175,5
V3	0,55	155	155	155	-	-	784	1,6	168,4
AC1	0,35	270	-	-	270	-	491	78,3	110,7
AC2	0,45	197	-	-	197	-	669	32,4	144,5
AC3	0,55	155	-	-	155	-	771	16,1	153,9
A1	0,35	270	-	-	270	-	491	48,6	140,4
A2	0,45	197	-	-	197	-	669	18,5	158,4
A3	0,55	155	-	-	155	-	771	8,7	161,3
EC1	0,35	162	-	-	-	378	578	8,6	180,4
EC2	0,45	118	-	-	-	275	733	5,9	171
EC3	0,55	93	-	-	-	216	822	3,1	166,9
E1	0,35	162	-	-	-	378	578	2,7	186,3
E2	0,45	118	-	-	-	275	733	1,6	175,3
E3	0,55	93	-	-	-	216	822	1,2	168,8
VAC1	0,35	162	270	270	108	-	468	48,3	140,7
VAC2	0,45	118	197	197	78	-	654	19,8	157,1
VAC3	0,55	93	155	155	61	-	759	11,8	158,2
VA1	0,35	162	270	270	108	-	468	20,4	168,6
VA2	0,45	118	197	197	78	-	654	8,5	168,4
VA3	0,55	93	155	155	61	-	759	4,6	165,4
VEC1	0,35	54	108	108	-	378	541	16,6	172,4
VEC2	0,45	39	78	78	-	275	708	7,1	169,8
VEC3	0,55	31	61	61	-	216	802	3,4	166,6
VE1	0,35	54	108	108	-	378	541	2,7	186,3
VE2	0,45	39	78	78	-	275	708	0,8	176,1
VE3	0,55	31	61	61	-	216	802	-	170

Fonte: “Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigénio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais” por Filho, 2002, p. 67

Tabela 20- Resistência à compressão das misturas em estudo, aos 91 dias de idade.

Traço	Relação W/L	Resistência à Compressão aos 91 dias (MPa)
R1	0,35	72,5
R2	0,45	51,8
R3	0,55	46,1
VC1	0,35	78,6
VC2	0,45	53
VC3	0,55	34,1
V1	0,35	59,1
V2	0,45	30,5
V3	0,55	25,4
AC1	0,35	79,6
AC2	0,45	59,4
AC3	0,55	39,3
A1	0,35	80,2
A2	0,45	51,9
A3	0,55	40,3
EC1	0,35	59,3
EC2	0,45	42,7
EC3	0,55	36,1
E1	0,35	49,1
E2	0,45	39,1
E3	0,55	32,6
VAC1	0,35	65
VAC2	0,45	49,9
VAC3	0,55	35,7
VA1	0,35	55,7
VA2	0,45	37,8
VA3	0,55	26,9
VEC1	0,35	49,1
VEC2	0,45	39,8
VEC3	0,55	26,4
VE1	0,35	46,2
VE2	0,45	33,1
VE3	0,55	20

Fonte: “Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais” por Filho, 2002, p. 79

Tabela 21- Absorção capilar de água das misturas em estudo.

<b>Traço</b>	<b>Relação W/L</b>	<b>Absorção Capilar de Água aos 91 dias (g/m<sup>2</sup>)</b>
R1	0,35	316,5
R2	0,45	469,7
R3	0,55	654,7
VC1	0,35	961,8
VC2	0,45	1439,3
VC3	0,55	1729,1
V1	0,35	2280,6
V2	0,45	2837
V3	0,55	3310,6
AC1	0,35	255,1
AC2	0,45	554,8
AC3	0,55	1103,5
A1	0,35	345,8
A2	0,45	1336,7
A3	0,55	2549,8
EC1	0,35	176,4
EC2	0,45	515,8
EC3	0,55	597,4
E1	0,35	285,5
E2	0,45	1203,7
E3	0,55	1485,6
VAC1	0,35	1213,4
VAC2	0,45	1742,9

Fonte: “Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais” por Filho, 2002, p. 128

### 3 MATERIAIS

Os materiais estão fortemente ligados à existência e à evolução da espécie humana. Desde a antiguidade, os materiais são usados com o objetivo de melhorar o nível de vida do ser humano.

A produção e transformação dos materiais em bens acabados constituem uma das mais importantes atividades de uma economia moderna.

Nos tempos modernos existe um vasto leque de materiais disponíveis com diferentes propriedades e campos de aplicação que permitem satisfazer vários requisitos técnicos. Em termos de materiais de construção, o vasto campo de matérias disponíveis permite um desenvolvimento eficaz da construção com base em determinados objetivos. Com base no que se pretende alcançar, pode-se proceder à combinação de matérias que nos permite aparentemente obter melhores resultados, em termos ambientais, de durabilidade, de resistências mecânicas, custos, etc.

A combinação de vários materiais gera compósitos. Os compósitos ou conjugados são combinações de dois ou mais materiais. A maioria destes materiais consiste em um elemento de reforço envolvido por uma matriz, com o objetivo de obter características específicas e propriedades desejadas.

Neste trabalho realizaram-se diferentes compósitos, reproduzindo-se assim uma matriz cimentícia com traço e trabalhabilidade aplicáveis a betão.

Para a constituição das matrizes cimentícias os materiais usados foram:

- Areia;
- Cinzas volantes;
- Cimento;
- Hidróxido de Cálcio;

- Metacaulino;
- Superplastificante.

### 3.1 Areia

Os grãos de areia na sua maioria são constituídos por quartzo devido à elevada resistência deste material às ações externas, apresentando uma cor clara (devido a natureza mineralógica da areia que tem grande influencia na cor desta). Porém, outros minerais podem existir nas areias, tais como, os feldspatos, micas, etc. Além disto, há outras areias que são constituídas na sua grande parte por minerais ferromagnesianos (olivinas, piroxenas, anfíbolos) ou por componentes líticos (fragmentos de calcário, basalto, entre outros).

As areias em que o seu principal mineral é o quartzo, devido à natureza deste mineral, riscam o vidro e o aço, não são atacáveis pelos ácidos e são praticamente insolúveis na água.

As areias calcárias, tanto como as areias que na sua constituição apresentam conchas ou fragmentos destas, são mais frágeis, fazendo-se efervescer com os ácidos e os seus materiais calcários são facilmente dissolvidos pelas águas gasocarbónicas.

A areia utilizada neste estudo é a areia fluvial.

A areia fluvial, contém quartzo, bem como micas, feldspatos, piroxenas, granadas e olivinas. Os grãos deste tipo de areia apresentam uma textura angulosa, devido ao meio fluvial que proporciona pouco transporte, por isso foram pouco roladas, sofrendo menos choques. Quanto mais a montante do rio, mais evidente esta característica está implícita.

As areias fluviais, apresentam ainda brilho, devido ao facto de serem transportadas pela água que lhes proporciona uma lavagem constante, e normalmente apresentam tonalidades diversas, devido ao facto de por vezes se depositarem à superfície, sofrendo assim oxidação.

Na Tabela 22, está representada a Análise Granulométrica da areia utilizada neste trabalho experimental, e na Figura 13, está representada a sua Curva Granulométrica.

Tabela 22- Análise Granulométrica da areia.



Areia			
Massa seca total $M_1$ (kg)			1,001
Massa seca após lavagem $M_2$ (kg)			1,001
Massa seca dos finos removidos por lavagem $M_2$ (Kg)			0
Dimensões (mm)	Massa (kg)	% Retido	% Cumulativa passado
63	0	0	100
31,5	0	0	100
16	0	0	100
8	0	0	100
4	0,0197	2	98
2	0,1962	20	78
1	0,2498	25	53
0,5	0,2164	22	32
0,25	0,192	19	13
0,125	0,0924	9	3
0,063	0,0162	2	2
P	0,0154		-
% Finos	-	1,5	-
Total	0,998	100	-

$$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} = 0,30\% \quad \text{Observação: Ensaio válido (<1\%)}$$

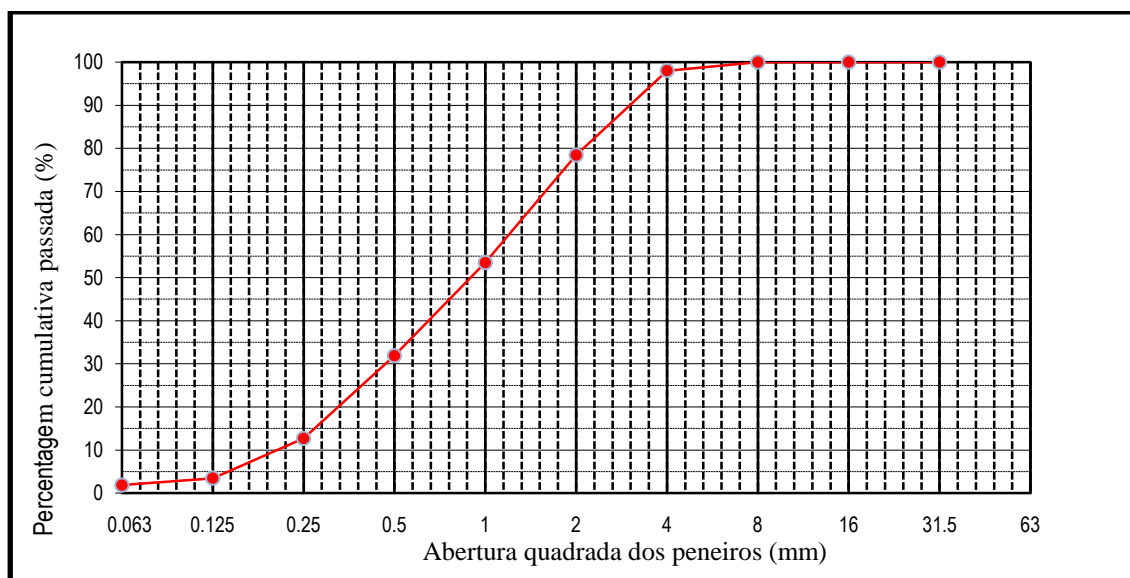


Figura 11- Curva Granulométrica da areia.

### 3.2 Cinzas volantes

As Cinzas volantes são um material, que têm origem na indústria da produção energética, através da queima do carvão. Após o carvão ser queimado a temperaturas que rondam os 530°C, as Cinzas volantes são escolhidas em precipitadores eletrostáticos ou mecânicos (Coelho, 2007).

Nos dias de hoje, a queima do carvão deriva de um processo controlado, processo esse que para um determinado tipo de carvão origina um determinado tipo de cinza volante relativamente uniforme. As características das Cinzas volantes resultam da classe e da quantidade de carvão que as originas tais como as condições de combustão do carvão. A quantidade de carbono livre tal como a quantidade de carbono por queimar, são duas características que condicionam as características das cinzas. A quantidade de carbono livre, surge através de uma ineficiência da combustão.

As Cinzas volantes, são constituídas por vários tipos de substâncias. Em grandes quantidades, podemos encontrar, compostos químicos, cristais de alumina, óxidos de ferro e cal. Em pequenas quantidades, existem outro tipo de componentes tais como, o MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub>, MnO e TiO<sub>2</sub>. Todas as substâncias dependendo do tipo de cinza, sofrem determinadas variações.

Em Portugal as Cinzas volantes são produzidas em duas centrais, as centrais de Sines e a do Pego.

Neste estudo, as Cinzas volantes utilizadas, foram as cinzas naturais de Compostilla provenientes da empresa " U.P.T. COMPOSTILLA", apresentando as propriedades a seguir discriminadas de acordo com o fornecedor.

Tabela 23- Propriedades Gerais das Cinzas volantes de Compostilla.

Tipo de cinza		Finura	Massa volúmica
Categoria	B	N	-
Valor declarado		15%	2420

Tabela 24- Propriedades Físicas das Cinzas volantes de Compostilla.

Análises Físicas								
Finura-1 (%>0,045mm)	Finura-2 (%>0,045mm)	Densidade kg/m <sup>3</sup>	Tempo de presa inicial (min)			Exigência de água	Índice de atividade (%)	
12,35	12,07	2420	t100	t75/25	Variação de t (%)	≤ 95% (100% Cimento)	I.A. 28Dias	I.A. 90Dias
			240	220			109	79

Tabela 25- Propriedades Químicas das Cinzas volantes de Compostilla.

Análises Químicas (%)										
Dia da Análise	Perda ao fogo	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>3</sub>	CaO livre	CaO reativo	SiO <sub>2</sub> reativo	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alcalis	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
06-Mai-11	4,85	0	0,12	0,1	2,7	40,8	89,9	0,25	1,9	1,92

### 3.3 Cimento

O Cimento utilizado nesta campanha experimental é do tipo CEM I 42,5R. Este tipo de Cimento é um produto de grande qualidade muito utilizado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada a muito elevada resistência.

De acordo com a empresa Secil, as principais características deste Cimento é o seu desenvolvimento rápido de resistências, e devido a ter resistências finais dentro da classe indicada (resistência aos 28dias). É um Cimento de cor cinzenta com elevado calor de hidratação.

Este Cimento pode ser usado em:

- Betão pronto ou fabricado em obra de elevada e muito elevada resistência inicial ou final;
- Betões leves, de elevada resistência;
- Betão aplicado em tempo frio;
- Betão com aplicações de pré-esforço a idades jovens.

- Caldas de selagem e injeção;
- Prefabricação ligeira pré-esforçada e pesada com alta rotatividade de moldes e pistas;

Relativamente ao CEM I 42,5R pode-se ver algumas das características Químicas, Mecânicas e Físicas, obtidas através da ficha técnica deste Cimento.

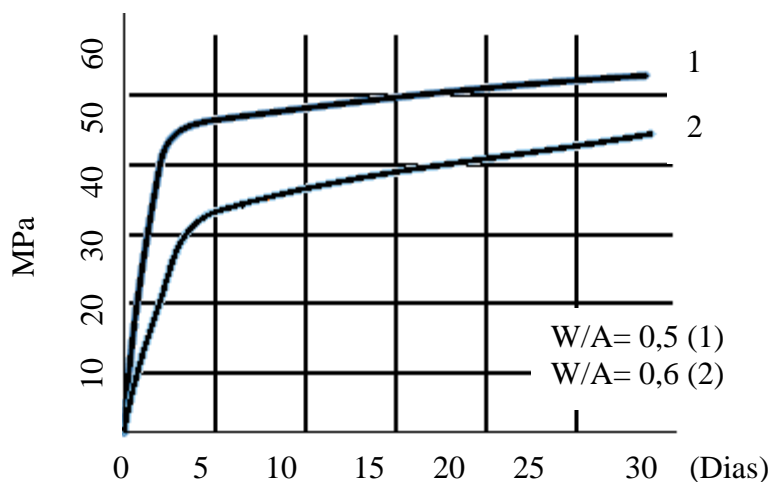


Figura 12- Valores indicativos de resistência à compressão de betão fabricado com 350 kg/m<sup>3</sup> de Cimento CEM I 43,5R

Tabela 26- Caraterísticas Mecânicas

Resistência à Compressão (MPa)			NP EN 196-1
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	
2 Dias	7 Dias	28 Dias	
≥20	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5	

Tabela 27- Caraterísticas Químicas.

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (Percentagens relativas à massa do Cimento)
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0 %
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0 %
Teor de Sulfatos (em SO <sub>3</sub> )	NP EN 196-2	≤ 4,0 %
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10 %

Tabela 28 – Caraterísticas Físicas.

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	$\geq 60$ min
Expansibilidade	NP EN 196-3	$\leq 10$ mm

### 3.4 Metacaulino

O Metacaulino é um material de origem pozolânica derivado do tratamento térmico de argilas cauliníticas (Figueiredo, 2011 cit. Siddique et al., 2009), na sua maioria, constituído por 50-55% de  $\text{SiO}_2$  e 40-45% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Figueiredo, 2011 cit. Poon et al., 2001; Sabria Malika Mansour, 2010).

As partículas de Metacaulino têm um tamanho médio definido de aproximadamente  $3\mu\text{m}$  sendo 99,9% das suas partículas inferiores a dimensão de  $16\mu\text{m}$  (Figueiredo, 2011 cit. Siddique e tal., 2009).

Devido às dimensões em cima enunciadas e tendo este material uma alta superfície específica, a sua atividade pozolânica é elevada.

O Metacaulino é obtido por desidroxilação quase total dos caulinos, processo onde se verifica uma perda substancial de água, com correspondência da coordenação do alumínio com o oxigénio (Pinto, 2004).

As alterações estruturais no caulino decorrem do processo de desidroxilação que conduz ao aparecimento do Metacaulino, que iniciam num determinado momento e acaba quando o Metacaulino estiver formado, para estas alterações o seu processo térmico tem grande influência (Pinto, 2004).

A fase do tratamento térmico do Metacaulino é das fases mais críticas do processo e dispendiosas, envolvendo apreciável consumo de energia, embora seja bastante inferior à da produção da clinquerização do Cimento Portland (Pinto, 2004), o que proporciona uma vantagem a substituição do Cimento por este tipo de material.

A temperatura a que se dá o tratamento térmico do Metacaulino não é consensual dependendo dos autores. (Figueiredo, 2011 cit. Shvarzman et al. 2001), sugere um tratamento térmico controlado no intervalo de 700-800°C.

Não só o tratamento térmico é importante para a formação do Metacaulino, mas também a moagem do material de modo a obter partículas inferiores a 5 $\mu$ m, resultando, deste modo, um Metacaulino de alta reatividade. (Figueiredo, 2011 cit. Souza et al., 2005).

Na Tabela 30, são apresentadas algumas das propriedades físicas de um Metacaulino comercial.

Tabela 29- Propriedades físicas de um MtK comercial

Propriedade	Valor
Densidade Específica	2,6
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,3 a 0,4
Forma física	Pó
Cor	Branco
Grau de brancura	79-82

Fonte: “O papel do Metacaulino na proteção do betão contra a ação dos cloretos” Adaptado Figueiredo, 2011. p. 7

Através de (Figueiredo, 2011 cit. Wild et al. 1996) na Tabela 31, apresenta-se uma análise comparativa do Cimento Portland relativamente ao Metacaulino

Tabela 30- Composição do Cimento e MtK

Óxidos	CP (% em massa)	MtK (% em massa)
SiO <sub>2</sub>	20,2	52,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,2	41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2	4,32
CaO	63,9	0,07
MgO	2,1	0,19
SO <sub>3</sub>	3	
Na <sub>2</sub> O	0,14	0,26
K <sub>2</sub> O	0,68	0,63
TiO <sub>2</sub>		0,81

Fonte: “O papel do Metacaulino na proteção do betão contra a ação dos cloretos” Figueiredo, 2011 cit. Wild et al, 1996. p. 7

O Metacaulino apresenta vários campos de aplicação bem como vários tipos de vantagens. (Figueiredo, 2011 cit. Siddique et al. 2009).

O Metacaulino pode ser aplicado em:

- Betão pré-fabricado; Fibrocimento; Argamassas, rebocos, material de reabilitação e de acabamentos de piscinas; Betão de alta performance, alta resistência e betão leve.

O Metacaulino tem como principais vantagens:

- Resistência à compressão e à flexão aumentadas;
- Permeabilidade reduzida;
- Aumento da resistência ao ataque químico;
- Aumento da durabilidade;
- Efeito da reação alcalis-sílica (RAS) reduzida;
- Retração reduzida devido ao efeito de empacotamento das partículas, aumentando a densidade do betão;
- Acabamento e trabalhabilidade aumentados;
- Potencial para o aparecimento de eflorescências reduzido;
- Melhorias no acabamento, na cor e na aparência.

O Metacaulino Utilizado neste estudo é um produto em fase de comercialização produzido pela Mibal. Este Metacaulino é extraído em Barqueiros, no Concelho de Barcelos e dá-se pelo nome comercial de MIBAL-C.

O Metacaulino utilizado neste trabalho experimental padece das seguintes propriedades expressas na Tabela 31.

Tabela 31- Propriedades do Metacaulino utilizado.

Difusão das partículas (%)	< 30 $\mu\text{m}$	99 $\pm$ 3
	< 10 $\mu\text{m}$	93 $\pm$ 5
	< 5 $\mu\text{m}$	82 $\pm$ 5
	< 2 $\mu\text{m}$	68 $\pm$ 6
Composição química (%)	SiO <sub>2</sub>	47
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,1
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,3
	MnO	-
	K <sub>2</sub> O	2
	Na <sub>2</sub> O	0,2
	MgO	0,15
	TiO <sub>2</sub>	0,3
	CaO	0,1
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-
Perda ao Fogo	12,75	

### 3.5 Superplastificante

Os Superplastificantes, também designados por adjuvantes de alta gama, são considerados os adjuvantes mais importantes para os betões.

Os Superplastificantes, sem modificar a sua consistência, permitem reduzir significativamente a dosagem de água de um dado betão, ou, para uma mesma quantidade de água, possibilitam aumentar consideravelmente o abaixamento/espalhamento.

O uso de Superplastificantes, permite uma redução da tensão de cedência de argamassas e betões, para valores muito baixos devido a dispersão das partículas de Cimento, permitindo uma maior fluidez do material. (Vieira, 2010 cit. Tattersall e Banfill, 1983, Flatt, 2004).

A elevada trabalhabilidade obtida com estes Superplastificantes, permite a colocação do betão em áreas com reduzida acessibilidade, ou com elevada densidade de armadura. A redução da razão água/Cimento, permite obter betões com maior resistência, impermeabilidade e durabilidade. Recentemente, betões como o betão auto-compactável e o betão de elevado desempenho, necessitam na sua incorporação de Superplastificantes (Vieira, 2010 cit. Romero, 2000).



Os Superplastificantes têm como principal objetivo:

- Aumentar a trabalhabilidade, mantendo constante o consumo de água e a razão água/ligante;
- Reduzir a água da amassadura, conservando-se a mesma trabalhabilidade. Para uma mesma dosagem de Cimento, reduz-se a razão água/Cimento, com consequência, obtém-se resistências mecânicas maiores e verifica-se um aumento da durabilidade;
- Diminuir o consumo de Cimento, através da redução de água e da manutenção da relação água/Cimento inicial, sem que se verifique uma queda da resistência para uma dada trabalhabilidade.

O Superplastificante usado neste trabalho experimental foi o Glenium Sky 617

### **3.5.1 Glenium Sky 617**

O Glenium Sky 617 é um Superplastificante que tem como base uma cadeia de éter policarboxílico modificado, com elevada manutenção da trabalhabilidade e da durabilidade.

O modo de funcionamento deste Superplastificante tem por base que os grânulos de Cimento sejam dispersos, pelo efeito eletrostático e por efeito esotérico das cadeias laterais hidrofílicas presentes na cadeia polimérica de base. Deste modo, obtém-se uma capacidade de separação e dispersão elevada e uma evidente capacidade de reduzir o conteúdo de água.

Este Superplastificante permite nas amassaduras onde é aplicado:

- Manter maior tempo de trabalhabilidade;
- Obter maiores resistências mecânicas nas primeiras idades;
- Reduzir o conteúdo de água;
- Melhorar o acabamento superficial;

O Glenium Sky 617 devido ao seu elevado poder dispersante, permite o seu uso em argamassas ou betões autocompatíveis; betões pós-esforçados ou pré-fabricados, sendo o seu maior alvo de aplicação, a indústria de betão pronto.

De uma forma geral, de acordo com o fabricante, este produto apresenta as seguintes características técnicas, expressas na Tabela 33.

Tabela 32- Características técnicas Glenium Sky 617

<b>Caraterísticas técnicas</b>	
Função Principal:	Superplastificante / Forte redutor de água
Marcação CE:	Segundo NP EN 934-2 como T11.1, T11.2
Aspetto:	Líquido Castanho
Densidade realativa (20°C):	1,05± 0,02 g/cm <sup>3</sup>
pH:	7,3±1,5
Teor em iões cloreto:	<0,1%

### 3.6 Cal Hidratada

As cals hidratadas, que se regem pela norma NP EN 459-1 (IPQ, 2011), são cals produzidas pela cozedura com temperatura máxima de 1200°C, da rocha calcária mais ou menos argilosa ou siliciosa, extintas e reduzidas a pó, com ou sem moagem.

As cals naturais têm na sua constituição uma porção de cal livre na forma de óxido de cálcio, na forma de óxido cálcio, que em água se transforma em hidróxido de cálcio dando-se a sua carbonatação. A carbonatação, é o processo pelo qual ocorre a transformação do hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio. Esta reação provoca a variação da microestrutura da argamassa e, conseqüentemente, um decréscimo da sua porosidade, alterando também algumas propriedades físicas, como a permeabilidade, a difusão de gases e a capilaridade (Carneiro, 2012 cit. Penas, 2008).

A cal hidratada utilizada para a realização das argamassas em estudo tem como proveniência a empresa, “Calcidrata - Indústrias de cal, SA”.

## 4 DESCRIÇÃO DO TRABALHO EXPERIMENTAL

### 4.1 Constituição da Matriz Cimentícia

Como anteriormente referido, este plano experimental é constituído por dois tipos distintos de matrizes cimentícias. Estes dois tipos de compósitos diferenciam-se entre si na constituição do ligante bem como algumas quantidades de certos materiais que derivam deste.

Um dos modelos das matrizes cimentícias tem como ligante o Cimento, Cinzas volantes e Metacaulino, enquanto o outro é constituída por Cimento e Cinzas volantes.

Tendo presente um trabalho, onde um dos objetivos consiste na substituição do Cimento Portland por adições minerais, em todas as composições, a quantidade de substituição de Cimento por adições minerais foi de, pelo menos, 60%. Assim, relativamente ao ligante, um dos modelos cimentícios apresentou 60% de CV, enquanto o outro, apresentou 50% de CV e 20% de MtK.

Cada um destes dois conjuntos se subdividiu em diferentes constituições, que originaram seis tipos de misturas onde a percentagem de hidróxido de cálcio adicionado, relativamente ao ligante, variou entre 0 a 25%, havendo um incremento de 5% de hidróxido de cálcio entre cada uma das argamassas.

O traço em massa adotado para as diversas composições foi de 1:1,75:0,33 / 0,35, onde os números correspondem a: Ligante: Areia: Água / Ligante. O 0,35 relativo a Água / Ligante é para as matrizes cimentícias em que não têm na sua constituição hidróxido de cálcio, o 0,33, para as restantes.

As misturas cimentícias realizadas têm por base um traço aplicável a betões auto-compactáveis originando uma matriz cimentícia que tem como objetivo extrapolar os resultados obtidos neste trabalho experimental para betões.

O traço escolhido teve por base uma composição de betão auto-compactável representada na Tabela 33. Através desta composição, usando apenas a fração fina, inferior a 5 mm, resulta

um traço aproximado do traço das composições de argamassa adotadas neste trabalho, reproduzindo-se assim, isoladamente a fase argamassa presente na composição representada na Tabela 34.

Tabela 33- Composição base para o traço adotado.

<b>Composição</b>	<b>A/L</b>	<b>C (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>CV (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Areia (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Brita (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
C 400	0,27	160	240	780	780

Fonte: “Betão eco-eficiente com reduzido teor de Cimento” Adaptado, Camões, 2011, p. 4

Na definição da quantidade dos materiais, foi tida em conta a quantidade e dimensão dos provetes necessários para a realização de todos os ensaios pretendidos, considerando o peso volúmico de cada material, permitindo definir, assim, a massa do ligante. Consequentemente, através do traço, foram definidas todas as outras quantidades.

A quantidade de água foi calculada tendo por base a quantidade do ligante mas, para este cálculo, ao ligante foi somado a quantidade de hidróxido de cálcio que a argamassa em estudo continha.

A quantidade de hidróxido de cálcio foi determinada, com base unicamente no ligante, multiplicando este, pela percentagem de cal que cada argamassa contém.

Para a percentagem de Superplastificante utilizado, teve-se como objetivo criar argamassas com boa trabalhabilidade e sem sinais de segregação, apresentando as argamassas valores de espalhamento compreendido entre 19 e 24 cm.

Na Tabela 34 apresenta-se o quadro relativamente aos diferentes constituintes e suas quantidades, na constituição das diferentes argamassas.

Tabela 34- Constituintes e suas quantidades na constituição das diferentes argamassas (kg)

	Ligante	CEM I 42,5R	CV	Mtk	Areia	Cal	Água	A/L
CV60	2,91	1,17	1,75		5,10	0,00	1,02	0,35
CV60 CH5%						0,15	1,03	
CV60 CH10%						0,30	1,07	
CV60 CH15%	2,96	1,18	1,78		5,18	0,44	1,12	0,33
CV60 CH20%						0,59	1,17	
CV60 CH25%						0,74	1,22	
M20 CV50	2,91	0,87	1,46	0,58	5,09	0,00	1,02	0,35
M20 CV50 CH5%						0,15	1,02	
M20 CV50 CH10%						0,30	1,07	
M20 CV50 CH15%	2,95	0,89	1,48	0,59	5,16	0,44	1,12	0,33
M20 CV50 CH20%						0,59	1,17	
M20 CV50 CH25%						0,74	1,22	

## 4.2 Amassadura

Para a realização das diversas amassaduras utilizaram-se equipamentos que cumpriam os requisitos da NP EN 196-1:2006, concretamente: balança; misturador e moldes.

O procedimento da amassadura foi baseado no descrito na norma NP EN 196-1:2006.

Para o fabrico das matrizes cimentícias, seguiu-se o seguinte procedimento:

- Deitar os materiais que constituem o ligante no recipiente (Figura 14), com adição posterior da cal que pode ou não estar incorporada dependendo da amassadura a realizar;
- Pôr em funcionamento o misturador (Figura 13) à velocidade lenta e começar a registar o tempo;
- Após 1min, introduzir lentamente toda a areia durante 30 segundos. Continuar a mistura à velocidade lenta mais 1 min, com objetivo de homogeneizar a mistura.
- Lentamente colocar a água durante 30 segundos, misturar em velocidade lenta a amassadura mais 1min.
- Parar o misturador. Nos primeiros 30 s, retirar por meio de uma espátula toda a argamassa aderente às paredes e ao fundo do recipiente e colocá-la no meio deste. Continuar de seguida a amassadura à velocidade rápida durante 60 s.

- Colocar o Superplastificante durante 30 s enquanto a misturadora funciona lentamente.
- Amassar à velocidade rápida durante 30 s e, seguidamente fazer os ensaios ao estado fresco.
- Após estes ensaios, colocar a misturadora à velocidade rápida durante 30s, retirar por meio de uma espátula toda a argamassa aderente às paredes e ao fundo do recipiente e colocá-la no meio deste, e amassar a argamassa à velocidade rápida durante mais 30s.
- Proceder a moldagem.



Figura 13-Misturadora.



Figura 14- Recipiente onde se procedeu a amassadura.

### 4.3 Preparação dos provetes

Os provetes utilizados foram de forma cúbica com 50 mm de aresta e provetes de forma prismática com 40 mm x 40 mm x 160 mm<sup>3</sup>.

### 4.4 Moldagem dos provetes

A moldagem dos provetes teve algumas alterações relativamente à norma NP EN 196-1:2006.

Devido a natureza do compósito em estudo, para a sua moldagem, não houve a necessidade de se recorrer ao compactador.

Os provetes foram moldados imediatamente a seguir à preparação da argamassa. Colocou-se a mistura de modo a encher os moldes em questão, nivelando com a espátula toda a superfície com objetivo de obter uma superfície homogénea.

Após a moldagem os moldes contendo a argamassa foram para uma câmara húmida com humidade relativa de aproximadamente 90% e temperatura aproximadamente de 21°C.



Figura 15- Moldes Usados.

## **4.5 Desmoldagem dos provetes**

A desmoldagem dos provetes foi efetuada com cuidado para não deteriorar os provetes e foi realizada, após 24h da sua moldagem. Após a desmoldagem, todos os provetes foram imersos em água a uma temperatura aproximadamente de 21°C.

## **4.6 Ensaio estado fresco**

### **4.6.1 Espalhamento (Slump-flow test)**

O ensaio do espalhamento é um dos ensaios mais comuns para avaliar as propriedades de betões auto-compactáveis no estado fresco, devido a sua simplicidade em termos de equipamento e procedimentos de ensaios.

Este ensaio, permite avaliar a capacidade de enchimento do betão auto-compactável. (Nepomuceno, 2005; Skarendahl et al., 2000)

O espalhamento foi realizado com base na norma EN 1015-3 com diversas modificações tendo em conta a natureza do compósito. A matriz cimentícia em estudo é auto-compactável, tendo em conta tal fato, o procedimento de compactação no molde tronco-cónico, tal como, as pancadas impingidas no procedimento de ensaio foram desprezadas.

Procedimento de ensaio:

- Colocar o molde tronco-cónico sobre a placa nivelada, fazendo-o coincidir como o círculo de 100mm. O molde e a placa devem estar previamente lubrificados.
- Encher o molde tronco-cónico com o compósito, sem compactação obtendo uma camada uniforme.



- Levanta-se o molde, após cessar o movimento do espalhamento da argamassa, mede-se o diâmetro do espalhamento através de duas leituras efetuadas em direções perpendiculares. Medição com precisão de 10mm.

- O espalhamento, é obtido pela média destes dois diâmetros.

Este ensaio permite obter:

- O valor do diâmetro médio do espalhamento da matriz cimentícia;

- Ocorrência de segregação, através de uma avaliação visual.

Equipamento utilizado:

- Molde tronco-cônico de acordo com as dimensões especificadas na norma EN 1015-3;

- Placa plana com superfície não absorvente, com espessura mínima de 2cm. O centro da placa deve conter uma cruz com linhas paralelas aos lados da placa e deve apresentar dois círculos com diâmetros de 100mm e 200 mm concêntricos com a placa.

- Régua graduada em milímetros.

## **4.7 Ensaio estado endurecido**

### **4.7.1 Compressão**

As construções edificadas por um engenheiro civil são criadas para a utilização direta ou indireta do Homem. Para isso, estas têm de ter segurança e resistência adequadas tendo em vista a sua utilização.

A resistência à compressão de uma estrutura depende da capacidade dos materiais empregues na estrutura. Um estudo da resistência à compressão é importante, pois este é um esforço que estará sempre aplicado a uma estrutura durante toda a sua vida.

A compressão é uma força que atua perpendicularmente à seção perpendicular do material onde é aplicada.

O ensaio à compressão, regeu-se através da norma EN 1015-11:1999.

De acordo a norma EN 1015-11:1999, os provetes que foram ensaiados à compressão não surgiram de prismas testados à flexão. Para este ensaio, foram testados três cubos, por idade, com aresta de 50mm, para cada amassadura nas seguintes idades: 2;7;28;90 (dias).

Procedimento de ensaio:

- Na devida data de ensaio, tirar os cubos da água onde estavam imersos no seu devido processo de cura.
- Secar cada cubo individualmente com um pano e deixa-los em ambiente de laboratório aproximadamente 2h.
- Efetuar a pesagem de cada amostra.
- Colocar a amostra a testar na máquina para o ensaio a compressão, com a face que permaneceu visível após a moldagem, virada para trás.
- Alinhar cuidadosamente a amostra de modo a que a carga seja aplicada em toda a largura das faces em contato com as placas.
- Programar a maquina para aplicação de carga de forma crescente, com variação de 2,4N/s.
- Proceder ao ensaio.
- Registrar os resultados.

O resultado à resistência à compressão é a média aritmética dos três resultados individuais arredondados a 0,1MPa, obtidos a partir dos três ensaios praticados em cada idade.

Admitindo-se um coeficiente de variação menor que 10%, os valores das três medições efetuadas que se encontrem mais afastados da média entre eles, são eliminados e é calculado a média dos dois valores restantes.

A média aritmética final é arredondada a 0,1MPa.



Figura 16- Ensaio à compressão

#### **4.7.2 Absorção de Água por Capilaridade**

A capilaridade é definida como a penetração de um líquido num material devido à tensão superficial na interface água-ar-poro.

A Absorção de Água por Capilaridade deve-se à diferença de pressão, quando o fluido entre em contato com os poros, entre a superfície livre do líquido e a superfície do mesmo líquido no poro. Este fenómeno dá-se quando uma das fases do material está em contato com a água, originando fenómenos de sucção no sentido ascendente.

A capilaridade pode ser analisada em termos de velocidade inicial de absorção e em termos de quantidade de água absorvida.

A dimensão dos poros correlaciona-se com a velocidade e a quantidade de água absorvida. Poros de menores dimensões originam menores velocidades iniciais de absorção, mas maior quantidade de água absorvida.

Segundo (Botas, 2009 cit. Rato, 2006) a Absorção de Água por Capilaridade é rápida inicialmente, diminuindo de seguida o ritmo até à estabilização. De acordo com este autor, a

água penetra primeiro nos poros mais acessíveis, sendo os poros mais pequenos (onde a absorção ocorre a um ritmo mais lento) e os poros cujo acesso depende destes, preenchidos posteriormente.

A Absorção de Água por Capilaridade pode ser analisada através do Coeficiente de Capilaridade e através da curva que relaciona a quantidade de água absorvida em função do tempo.

O Coeficiente de Capilaridade permite conhecer a velocidade com que a água inicialmente é absorvida. A curva que relaciona a quantidade de água absorvida em função do tempo, permite correlacionar a absorção de água no tempo e a quantidade de água absorvida até ocorrer a estabilização.

O ensaio da Absorção Capilar teve por base a norma EN 1015-18:2002

Para este ensaio foram utilizados três prismas de cada argamassa. Estes prismas foram retirados da água na data de ensaio (104 dias), sendo posteriormente colocados na estufa até obterem massa constante.

Após obtida massa constante, os prismas foram impermeabilizados com tinta plástica de modo a que Absorção de Água por Capilaridade apenas ocorra através de uma das suas menores faces. Posteriormente à sua impermeabilização, os prismas foram expostos ao ensaio à flexão, partindo-se a amostra prismática em duas partes, originando assim seis amostras que foram testadas a absorção capilar.

Procedimento de ensaio:

- Colocou-se as amostras no tabuleiro, com as faces quebradas, devido ao ensaio da flexão, para baixo;
- Entre a superfície quebrada dos prismas e o suporte do tabuleiro, colocou-se uma rede que permite apoiar as amostras e permite o contacto da água com a parte partida da amostra (Figura 17);
- Profundidade de água compreendida entre 5mm a 10mm, mantendo-se a água constante, em todo o ensaio;
- Medições de tempo para a execução de consecutivas pesagens;

- Em cada pesagem, colocar antes a amostra em uma superfície não absorvente (no presente estudo, um vidro), durante 60 s, de seguida fazer medição;
- Colocação de tampa para impedir a evaporação de água do tabuleiro (Figura 18).

O coeficiente de absorção capilar foi calculado através do declive da reta da Absorção capilar/ $\sqrt{\text{min}}$ , compreendida no intervalo de tempo (10min-90min).



Figura 17- Recipiente onde se efetuou a Absorção capilar.



Figura 18- Recipiente onde se realizou a absorção capilar (Recipiente fechado)

### 4.7.3 Absorção de Água por Imersão à pressão atmosférica

O Ensaio da absorção por imersão foi realizado a partir da especificação do LNEC 394-1993, ensaio à pressão atmosférica. Este ensaio permite caracterizar a porosidade aberta.

Segundo a especificação do LNEC 394-1993, a absorção por imersão é calculada em percentagem através da seguinte fórmula:

$$Ai = \frac{m1-m3}{m1-m2} \times 100, \text{ onde}$$

m1- massa do provete saturado no ar, expressa em gramas.

m2- massa hidrostática do provete saturado, expressa em gramas.

m3- massa do provete seco, expressa em gramas.

Para a determinação do m1 e m2, a referente especificação, indica que se deve introduzir os provetes num recipiente com água de consumo público à temperatura  $20 \pm 3^\circ\text{C}$  até massa constante, em intervalos de 1h sucessivos, o provete deve estar 1/3 imerso em água, 2/3 e por fim, deve estar coberto de água, não ultrapassando esta os 20mm da sua face superior.

Após alcançada massa constante, para a determinação de m1, deve procedesse à secagem do provete com um pano e dá-se a sua pesagem.

Os provetes em estudo, após desmoldagem foram colocados em água onde ai permaneceram até a esta data de ensaio (104 dias). Aquando do ensaio, os provetes foram retirados da água considerando-se já saturados, e foi determinado assim o m1 e m2.

A determinação do m3 foi realizada de acordo com a especificação em estudo, os provetes após terem sido usados para determinar o m1 e m2, foram para a estufa a  $105 \pm 5^\circ\text{c}$  onde passado 10 dias, apresentando massa constante, foi realizada a sua leitura.

Os provetes utilizados para este ensaio, foram 3 cubos de 50mm de aresta para cada amassadura.



Figura 19- Pesagem da massa hidrostática do provete saturado, expressa em gramas.

#### 4.7.4 Carbonatação

A carbonatação é um processo físico-químico de neutralização da fase líquida do betão, saturada de hidróxido de cálcio e outros compostos alcalinos hidratados.

Na atmosfera, os principais constituintes que podem produzir reações de neutralização no betão são o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e o gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

O nome atribuído ao processo de Carbonatação deriva da neutralização do hidróxido de cálcio pelo  $\text{CO}_2$ . Em condições propícias à carbonatação, o  $\text{CO}_2$  difunde na estrutura porosa do betão e, gradualmente, dissolve na solução os poros, produzindo o  $\text{CO}_3^{2-}$  (Filho, 2008 cit. Taylor, 1997). O  $\text{CO}_3^{2-}$  combina-se com o ião  $\text{H}^+$ , ião proveniente da hidrólise da água, formando o ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). O ácido carbônico reage rapidamente com os iões alcalinos dissolvidos na solução do poro, promovendo a neutralização da fase líquida do betão e originando o carbonato de sódio, o carbonato de potássio e bicarbonato de cálcio (Filho, 2008 cit. Houst e Wittmann, 2002).

Um dos maiores problemas relativamente à carbonatação assenta na diminuição do pH para valores inferiores a 9, comparativamente aos valores do betão não carbonatado, valores de pH superiores a 12. Com a diminuição do pH, a frente de carbonatação avança progressivamente para o interior do betão podendo atingir a armadura, provocando a sua despassivação. A

despassivação da armadura deixa a armadura sujeita às reações com o oxigénio e a água. Estas reações eliminam a camada de óxido protetora das armaduras e permite o início da corrosão, afetando assim a durabilidade do betão.

Para uma estrutura estar exposta à carbonatação tem que haver uma difusão gasosa do CO<sub>2</sub>, na fase aquosa, nos poros do betão. Após tal difusão, ocorre a reação química do CO<sub>2</sub> com os elementos alcalinos (Cadore, 2008 cit. Ishida e Maekawa, 2001).

De acordo com (Cadore, 2008 cit. Mehta e Monteiro, 1994), os compostos hidratados do Cimento suscetíveis a carbonatação são o hidróxido de cálcio, o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH).

De uma forma simplificada, a carbonatação pode ser explicada pela Figura 19. Nesta Figura, podemos ver de uma forma simplificada da uma das equações de neutralização que ocorrem no decorrer deste processo.

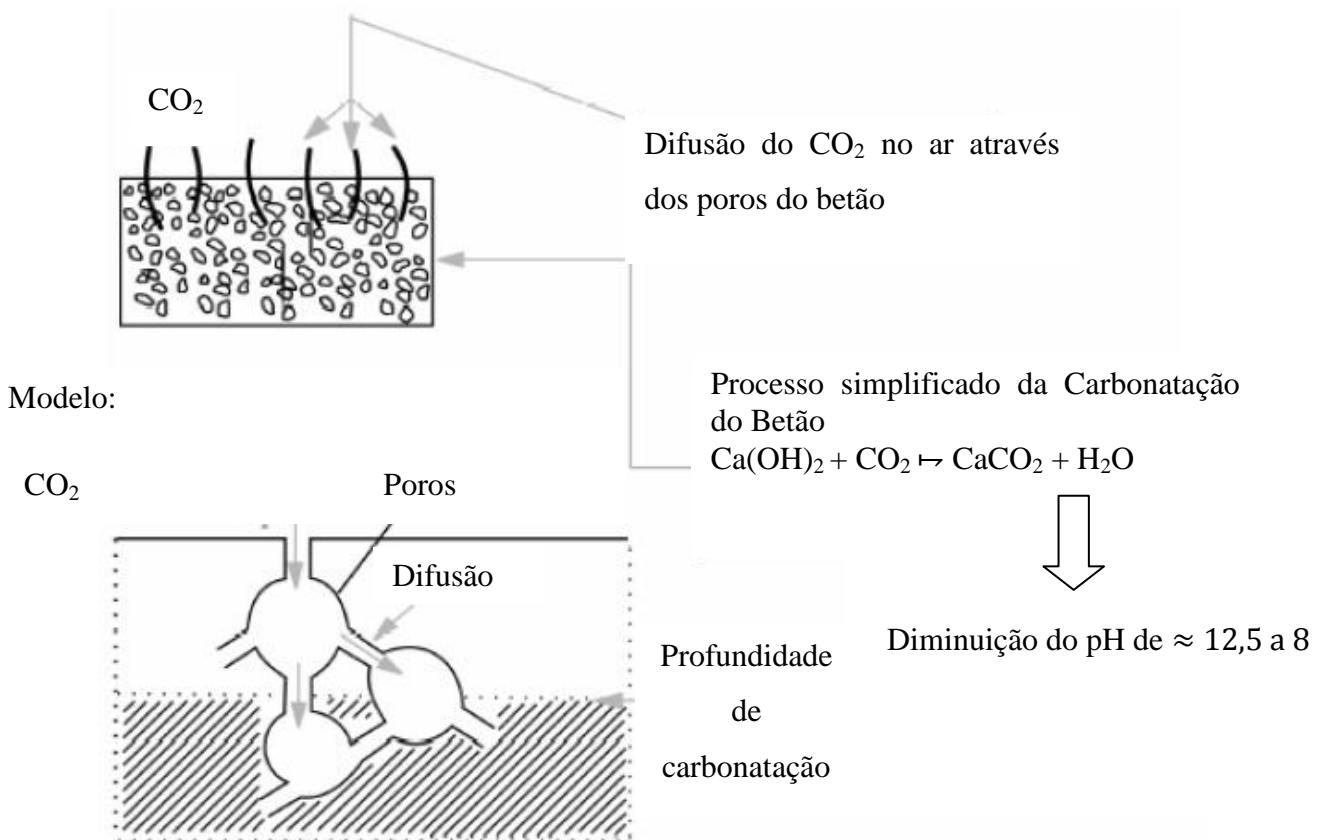


Figura 20- Processo de carbonatação simplificado.



Segundo (Cadore, 2008 cit. Ngala e Page, 1997) com a precipitação do  $\text{CaCO}_3$  ocorre uma redução da porosidade da pasta do Cimento, por este composto possuir um maior volume que os outros compostos hidratados, como o CH. Contudo, ao mesmo tempo que se observa uma diminuição da porosidade total, verifica-se um aumento da porosidade capilar em consequência da decomposição do CSH.

Outra inconveniente da carbonatação é a retração, causada pela perda de moléculas de água na reação principal e a diminuição de volume na pasta de Cimento devido a dissolução de  $\text{Ca(OH)}_2$  em zonas onde ele está sob tensão e precipitação do  $\text{CaCO}_3$  em espaços não sujeitos à tensão.

Para o ensaio da carbonatação os provetes foram colocados na camara as 104 dias de vida. E os ensaios foram realizados aos 7, 14 e 28 dias após a sua colocação na camara.

Foram definidos para este ensaio, dois prismas de  $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}^3$ .

Procedimento:

- Colocar os prismas 14 dias ao ambiente de laboratório, antes de os colocar na câmara de carbonatação.
- Após decorridos os 14 dias em ambiente de laboratório, os prismas são vedados com parafina, apresentando-se apenas duas fases longitudinais deste ausente de vedação.
- Ao fim da selagem, são introduzidos numa camara climática com nível de dióxido de carbono de  $(4 \pm 0,5)\%$ , temperatura  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  e humidade relativa de  $(55 \pm 5)\%$ .
- Decorridos os determinados períodos de exposição, uma pequena fatia é quebrada de cada primas e testadas as profundidades de carbonatação.
- De seguida, ao corte do prisma, de modo a originar uma fatia a testar, este é de novo selado de modo a apenas as fases iniciais estarem expostas ao ambiente da camara.

O cálculo da profundidade média da carbonatação para cada amostra foi realizado a partir da média de dez medições realizadas nas faces carbonatadas de cada fatia da amassadura (Figura 21).

Após determinada a profundidade de carbonatação foi determinado o Coeficiente de Carbonatação.



Figura 21- Fatia de argamassa carbonatada

## 5 ANÁLISE DE RESULTADOS

### 5.1 Ensaio ao estado fresco

#### 5.1.1 Espalhamento (Slump-flow test)

As matrizes cimentícias realizadas são passivas de serem incorporadas em betões. Para poderem fazer parte de betões, estas, têm de ter boa trabalhabilidade. Assim sendo, o ensaio do espalhamento realizado, teve como objetivo garantir um espalhamento das argamassas, na ordem de grandeza compreendida entre os 19-24cm.

Tendo presente tal objetivo fez-se variar o Superplastificante.

Na Tabela 35, estão representados os resultados de espalhamento de cada amassadura, tal como a quantidade de Superplastificante aplicada.

Tabela 35- Resultados do ensaio do espalhamento das amassaduras realizadas

Argamassas - Slump-flow test	Espalhamento (cm)	SP (%)
CV60	30,00	0,92
CV60 CH5%	21,00	0,84
CV60 CH10%	21,00	0,73
CV60 CH15%	21,50	0,51
CV60 CH20%	20,00	0,66
CV60 CH25%	24,00	0,77
M20 CV50	21,00	1,20
M20 CV50 CH5%	19,75	1,02
M20 CV50 CH10%	19,60	1,50
M20 CV50 CH15%	23,50	1,50
M20 CV50 CH20%	19,00	1,15
M20 CV50 CH25%	19,25	1,07

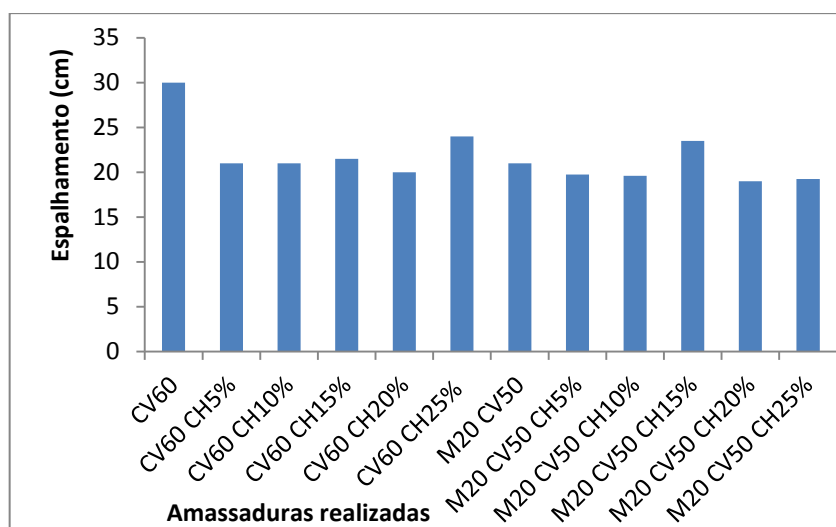


Figura 22- Espalhamento realizado, comparação de resultados/versão gráfico

É de realçar que a dosagem de Superplastificante, para regular o espalhamento, foi afinada experimentalmente por tentativas. A amassadura CV60, aquando da sua preparação, apresentava-se, inicialmente, pouco fluida. O seu estado de fluidez foi-se alterando substancialmente, devido à inserção, lenta e crescente, de Superplastificante, apresentando-se este valor um pouco fora da perspetiva global.

## 5.2 Ensaio estado endurecido, amostras constituídas por Cimento, Cinzas volantes e Metacaulino

### 5.2.1 Compressão

Para o ensaio à compressão, foram testados três cubos, por idade, com aresta de 50mm, para cada amassadura nas seguintes idades: 2;7;28;90 (dias).

Os ensaios à compressão realizados ao longo do tempo e a sua evolução estão expressos na Figura 23 e na Tabela 36.

Este ensaio para as amassaduras do de Cimento, Cinzas volantes e Metacaulino, permitiu verificar, de acordo com os resultados obtidos na Figura 23 e na Tabela 36, que, nas primeiras idades, a amostra padrão apresenta maiores valores de resistência à compressão, sendo esta

amostra ultrapassada em termos de resultados pelas amostras M20CV50CH15% e M20CV50CH10%, por volta do dia 15 e 17, respectivamente. Após superarem, a amostra padrão, estas duas amostras, apresentam maiores resultados à resistência à compressão até a última data de ensaio (90 dias).

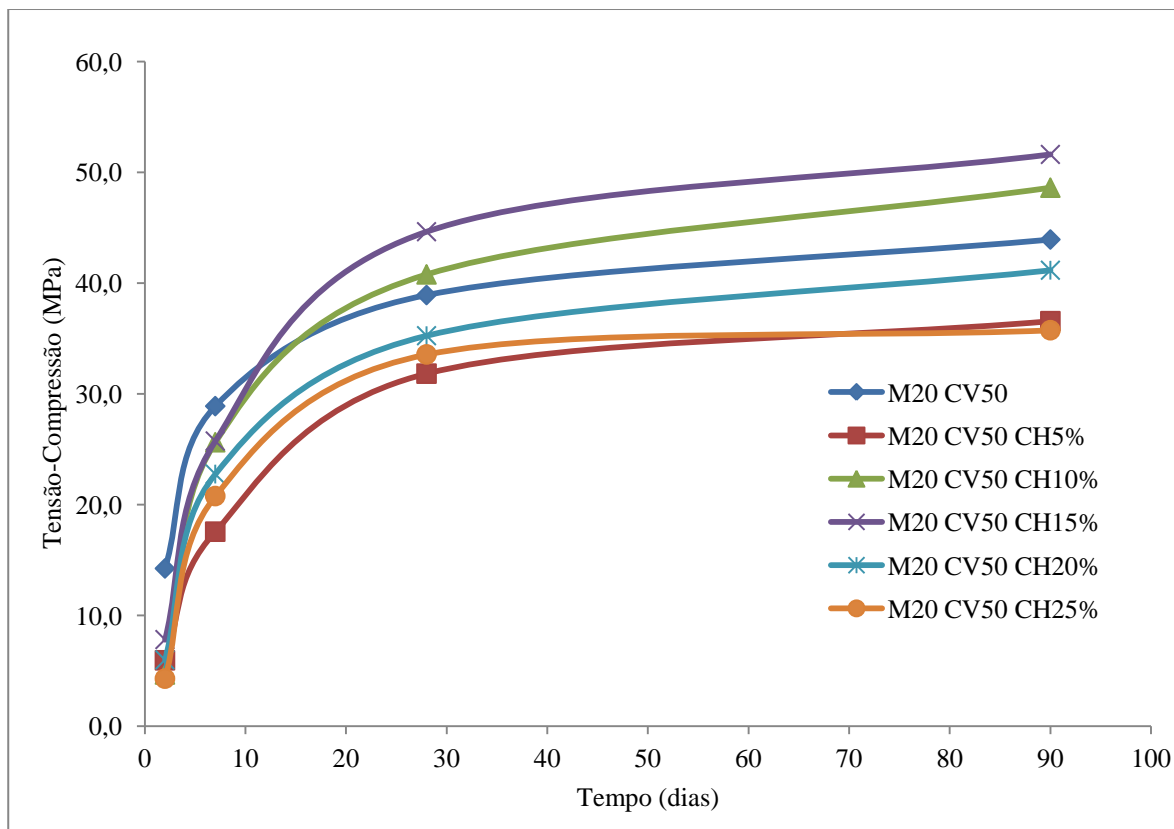


Figura 23- Evolução da resistência à compressão das amostras M20CV50CH com o tempo

Tabela 36- Dados numéricos do ensaio à compressão das amostras M20CV50CH expressos em MPa

Argamassa	2dias	7dias	28dias	90dias
M20 CV50	14,20	28,90	38,90	43,90
M20 CV50 CH5%	6,00	17,60	31,80	36,60
M20 CV50 CH10%	4,70	25,60	40,80	48,60
M20 CV50 CH15%	7,80	25,70	44,60	51,60
M20 CV50 CH20%	6,00	22,80	35,30	41,20
M20 CV50 CH25%	4,30	20,80	33,60	35,70

Uma possível explicação, para este acontecimento, assenta na reação pozolânica. De acordo com o ponto 2.3 desta dissertação, esta reação tem início entre 7 a 15 dias após a mistura. Em contrapartida, a hidratação do Cimento, ao fim de 7 a 15 dias já está em estado avançado. Tal acontecimento explica a razão da amostra padrão ter valores superiores às outras amostras nas idades iniciais. A mostra padrão, não contendo cal, na sua incorporação, apresenta maiores resistências à compressão, considerando que, neste período, a reação pozolânica ainda não tenha ocorrido, ou caso já tenha ocorrido, a sua ocorrência foi em reduzida escala. Por isso, um fator predominante passa a ser a natureza dos materiais que incorporam a matriz cimentícia. Considerando que a adição de cal é uma adição por excesso, ou seja, não foi adicionada com objetivo de substituir nenhum constituinte do ligante, mas com o objetivo de o complementar, esta adição vai aumentar o volume de compósito comparativamente com a amostra padrão originando, assim, uma matriz cimentícia ligeiramente mais deficitada em cimento e MtK refletindo-se na resistência à compressão nas primeiras idades. O principal objetivo da cal é interagir com as pozolanas para efetuar a reação pozolânica, propósito que nas primeiras idades de vida do compósito não é completamente alcançado.

Analisando o gráfico, tendo como objetivo os interesses manifestados na realização deste trabalho, podemos concluir que, em termos de resistência à compressão, a percentagem ideal de cal que proporcionou um maior desenvolvimento na resistência à compressão foi de 15%.

A reação pozolânica consome a cal promovendo a sua reação, originando vários produtos de reação, com principal destaque para o CSH que promove as resistências mecânicas.

As matrizes cimentícias com piores prestações, relativamente à resistência à compressão, são as misturas M20CV50CH25%, M20CV50CH5% e M20CV50CH20%.

Uma justificação possível para estes valores pode ser expresso no excesso de cal dos compósitos M20CV50CH20% e M20CV50CH25%. Parte da cal, inicialmente contida neste compósito, pode ter sido consumida pela reação pozolânica mas, a restante, pode ter sido lixiviada. Esta lixiviação pode ter originado o aparecimento de poros, que inicialmente estavam ocupados pela cal, provocando um aumento de vazios para a composição. Este comentário tem por base, aspetos visuais que foram perceptíveis. Algumas matrizes cimentícias, com maior teor de cal, apresentavam pó visível nas suas faces, em outras, este pó era notório através do tato. (Figura 24)



Figura 24- Lixiviação

A composição M20CV50CH5% apresentou um resultado atípico relativamente à resistência à compressão no contexto da evolução das resistências à compressão das misturas de Cimento, Cinzas volantes e Metacaulino. Para esta matriz cimentícia, a evolução da curva associada ao processo evolutivo das resistências à compressão, era de esperar, esta matriz cimentícia estar compreendida aproximadamente entre a curva da Mistura Padrão e da mistura M20CV50CH10%.

### **5.2.2 Absorção de Água por Imersão à pressão atmosférica**

A Absorção de Água por Imersão é um ensaio que nos permite caracterizar a porosidade aberta.

O Ensaio da absorção de água por imersão foi realizado a partir da especificação do LNEC 394-1993 para as matrizes cimentícias realizadas, aos 104 dias de idade, e os seus resultados estão indicados na Figura 25.

Através da análise da Figura 25 podemos verificar que a Absorção de Água por Imersão é crescente com a incorporação de cal.

A mistura M20CV50CH5% apresenta um resultado descontextualizado da perspetiva global. Em simultaneidade com este resultado, considerando os valores atípicos também verificados para a resistência à compressão, parece antever-se a existência de anomalias associadas a esta

mistura. Denota-se assim, um aumento da Absorção de Água por Imersão em função do incremento de cal.

O hidróxido de cal tem como um dos seus objetivos, proceder ao refinamento dos poros. Uma possível explicação para os resultados obtidos, está relacionada com a lixiviação descrita em 5.2.1.

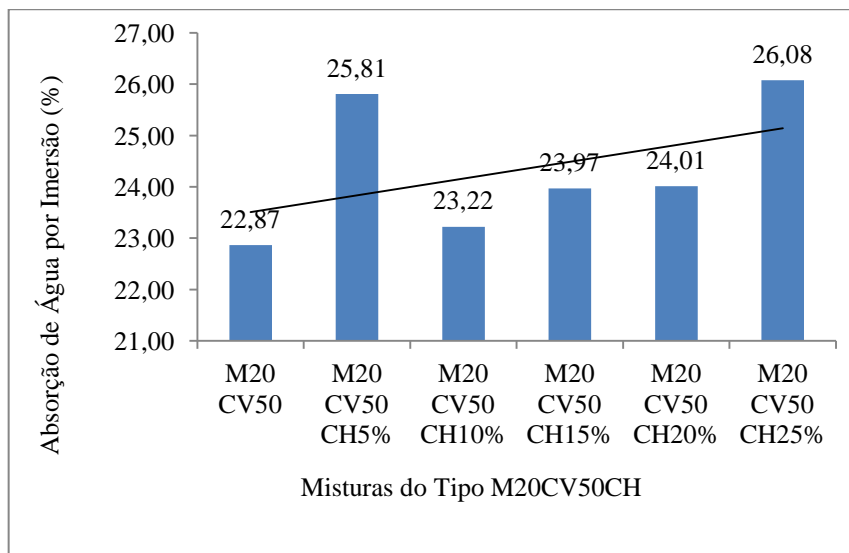


Figura 25- Absorção de Água por Imersão das amostras M20CV50CH

### 5.2.3 Absorção de Água por Capilaridade

O ensaio da Absorção de Água por Capilaridade permite avaliar a capacidade das matrizes cimentícias em absorver líquidos através dos seus vasos capilares.

Este ensaio foi realizado segundo o procedimento descrito em 4.7.2 para uma idade de 104 dias dos provetes.

A Absorção de Água por Capilaridade pode ser analisada através da curva que relaciona a quantidade de água absorvida em função do tempo e do Coeficiente de Capilaridade.

Na Figura 26, pode-se observar a Absorção capilar das argamassas do Tipo M20CV50CH, nos primeiros 2 dias de pesagens.



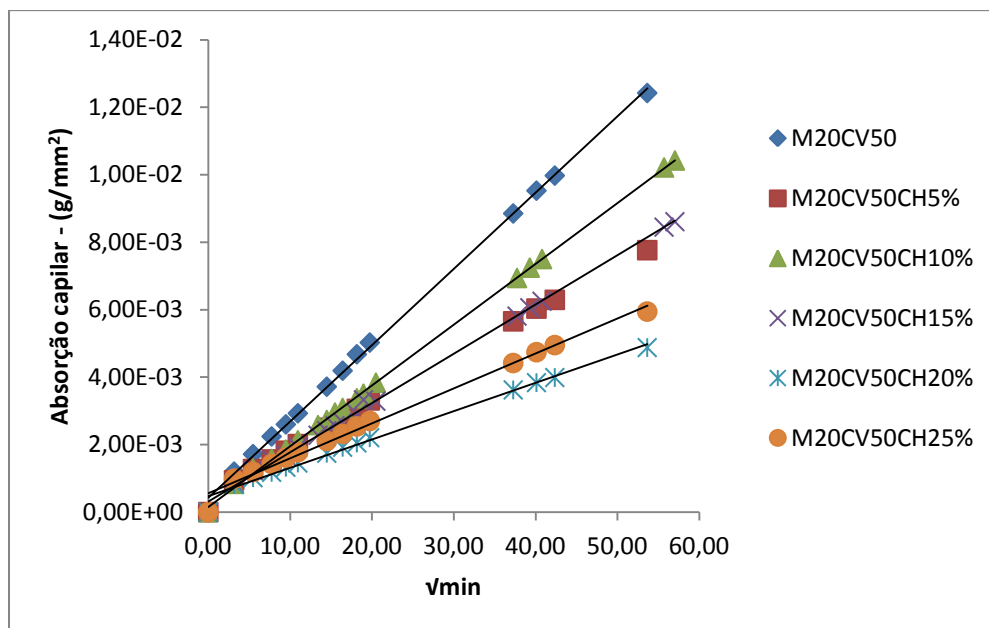


Figura 26- Evolução da absorção capilar, pesagens efetuadas nos 2 primeiros dias para as misturas com Metacaulino

O coeficiente de absorção capilar presente na Figura 27 foi calculado através do declive da reta da Absorção de Água por Capilaridade, por unidade de superfície /  $\sqrt{\text{min}}$ , nos intervalos de tempo (10min-90min).

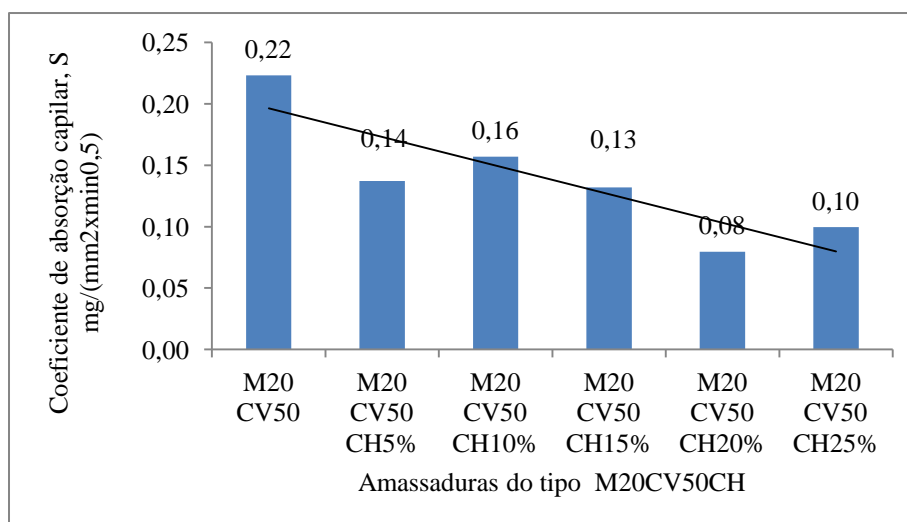


Figura 27- Coeficiente da absorção capilar das mostras M20CV50CH

Neste trabalho experimental denotou-se em geral um decréscimo do Coeficiente de Capilaridade em função do incremento crescente de hidróxido de cálcio.

A adição de Cal parece ter alterado a porometria das composições. Ou seja, quanto maior a percentagem de cal adicionada prevê-se menor o diâmetro dos poros dos compósitos, diminuindo assim o Coeficiente de Absorção Capilar, S.

Contudo com base nos resultados da absorção de água por imersão, a porosidade aumentou, ou seja, a incorporação de cal parece ter aumentado o número de poros e diminuído a sua dimensão.

(Browne, 1991), relaciona o Coeficiente de absorção capilar expresso em  $\text{mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{0,5})$ , com a classe de qualidade do betão, de acordo com a Tabela 37.

Tabela 37- Coeficiente de absorção capilar, de acordo com a Classe de qualidade segundo Browne, 1991

Coeficiente de absorção capilar, S	Classe de qualidade
$S \geq 0,2$ ( $\text{mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{0,5})$ )	Reduzida
$0,1$ ( $\text{mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{0,5})$ ) $< S < 0,2$ ( $\text{mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{0,5})$ )	Média
$S \leq 0,1$ ( $\text{mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{0,5})$ )	Elevada

De acordo com este autor, adaptando o seu raciocínio a matrizes cimentícias, com objetivo de as classificar relativamente à sua classe de qualidade, a Mistura Padrão apresenta qualidade reduzida, a mistura M20CV50CH20% ostenta qualidade elevada e as restantes argamassas do tipo M20CV50CH, possuem qualidade média.

#### 5.2.4 Carbonatação

O ensaio da carbonatação foi realizado segundo o procedimento descrito em 4.7.4. Para este ensaio os provetes foram colocados na camara as 104 dias de vida e os ensaios foram realizados aos 7, 14 e 28 dias após a sua colocação na camara.

A Figura 28 relaciona a profundidade de Carbonatação em função da raiz do tempo. Através desta Figura observa-se que relativamente a amostra padrão, a incorporação de cal teve tendência a provocar um ligeiro aumento, quase insignificante, da profundidade de carbonatação, exceção para as misturas M20CV50CH10% e M20CV50CH15%.

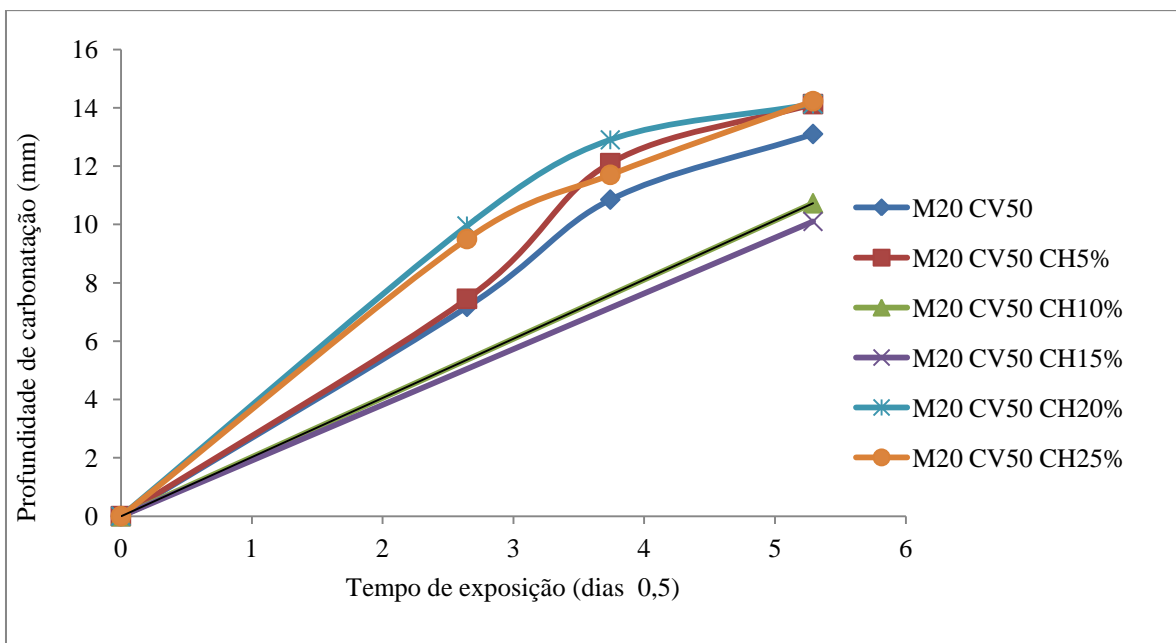


Figura 28- Profundidade de carbonatação das misturas com Metacaulino, em função do tempo.

O coeficiente de carbonatação, representado na Figura 29, associado à evolução da profundidade de carbonatação nos primeiros 28 dias apresentou a mesma tendência verificada relativamente à profundidade de carbonatação. A incorporação de cal teve propensão a provocar um ligeiro aumento, quase insignificante, do coeficiente de carbonatação, exceção para as misturas M20CV50CH10% e M20CV50CH15%.

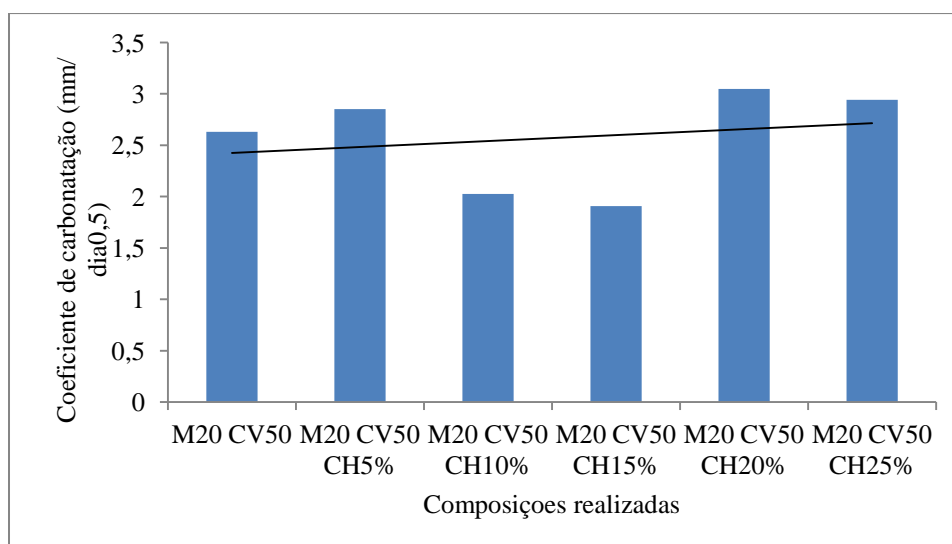


Figura 29- Coeficiente de Carbonatação das misturas M20CV50CH

Estes resultados descredibilizando à partida a mistura M20CV50CH, estão de acordo com a tendência associada aos resultados à compressão. Assim, prognostica-se um melhoramento da profundidade de carbonatação e do coeficiente de carbonatação com adições de cal até 15%.

Neste trabalho experimental, duas possíveis situações são passivas de ocorrência. As misturas com mais de 15% de cal parecem ter excesso de cal que se revê no ensaio à carbonatação tanto como no ensaio à compressão. O excesso de cal por parte destas misturas, relativamente a carbonatação, tem como um dos objetivos repor a reserva alcalina aumentando o teor de hidróxido de cálcio na fase intersticial, como forma de incrementar o tempo necessário para as reações de neutralização com o hidróxido de cálcio. Esta incrementação age na redução da velocidade da frente de carbonatação prevenindo a despassivação da armadura. Contudo fase ao aumento da cal parece que ocorre um aumento da porosidade intersticial destas misturas com que fazem com que o CO<sub>2</sub> penetre mais facilmente aumentando este efeito. Para as misturas até 15% de cal os resultados antevem uma diminuição porosa fruto da reação pozolânica, dificultando a penetração do CO<sub>2</sub> e diminuindo a carbonatação.

### **5.3 Ensaio estado endurecido, amostras constituídas por Cimento e Cinzas volantes**

#### **5.3.1 Compressão**

A Figura 30 expressa os dados relativos ao ensaio realizado à resistência à compressão para os compósitos constituídos por Cimento e Cinzas volantes.

As argamassas constituídas por Cinzas volantes e Cimento, relativamente a resistência à compressão, a amassadura com melhores propriedades é a amassadura padrão, sendo superada pela amassadura CV60CH25% e CV60CH5%, próximo da última data de ensaio (90 dias), fato que podemos observar na Figura 30.

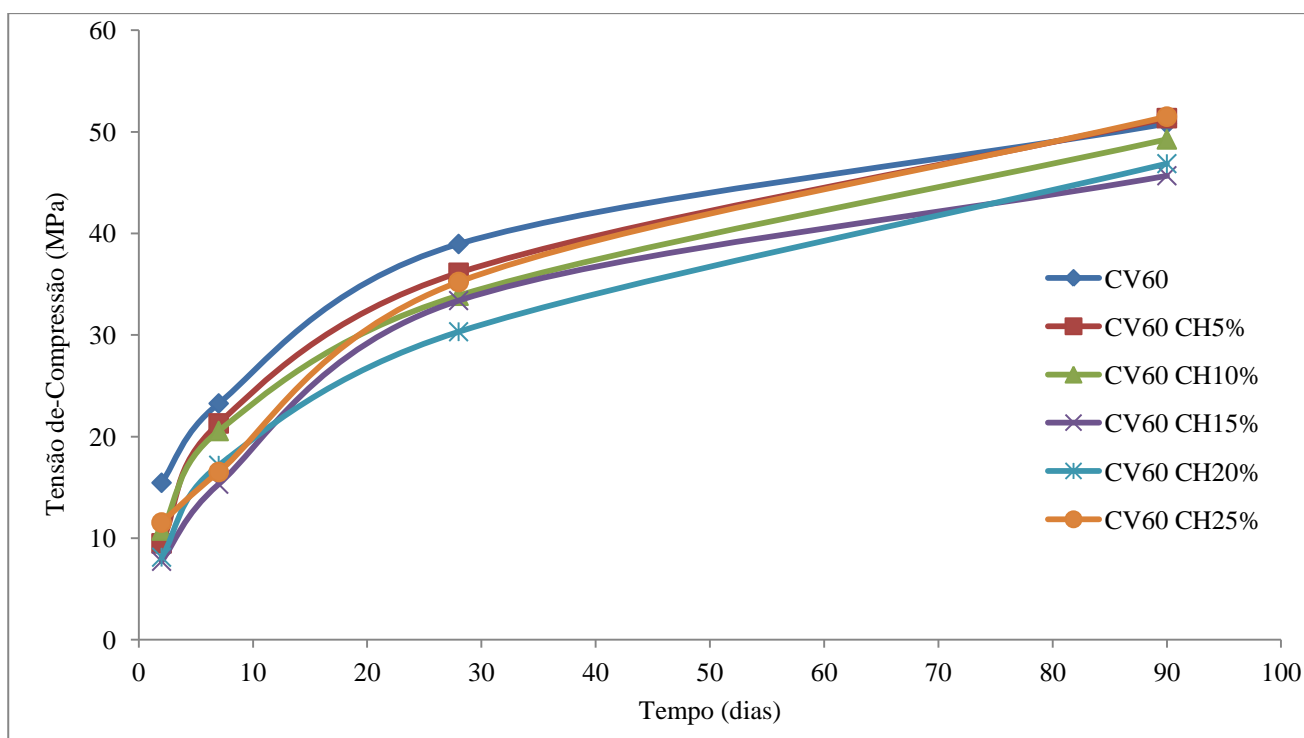


Figura 30- Evolução da resistência a compressão das amostras CV60CH

As restantes composições, a sua posição relativamente a amostra padrão, está relacionada com o teor de cal. Os compósitos com menores percentagens de cal apresentam valores cada vez mais próximos da amassadura padrão.

Denota-se contudo, uma pequena evolução e aproximação das resistências à compressão ao longo do tempo. Esta observação, esta relacionada com a evolução da reação pozolana das Cinzas volantes, como vimos no ponto 2.3.3 desta dissertação. A reação pozolana das Cinzas volantes dá-se com maior intensidade à medida que o tempo vai passando, reagindo assim, a pozolana com a cal, originando melhores propriedades mecânicas.

A amassadura CV60CH25% apresenta uma evolução um pouco incoerente, devido à mudança de atitude deste constituinte perante a resistência à compressão. Entre os 2 e os 7 dias, apresenta uma evolução lenta da sua resistência à compressão, após estas idades, a sua evolução perante as outras amassaduras é notória, não havendo explicação coerente para tal fato. Tendo em conta a perspetiva global dos resultados gerados era de esperar que a composição CV60CH25% padecesse de resultados inferiores ou semelhantes à mistura de C60CH20%.

### 5.3.2 Absorção de Água por Imersão à pressão atmosférica

A Figura 31 representa os resultados obtidos à Absorção de Água por Imersão.

Em correspondência às amostras do tipo M20CV50CH, as amostras do tipo CV60CH, com a incorporação de cal apresentaram um crescimento da Absorção de Água por Imersão.

A Absorção de Água por Imersão, representada na Figura 31, para pequenas quantidades de incremento da cal (menor que 15%), apresenta-se quase constante comparativamente com a amostra padrão, diminuindo até ligeiramente. Para adições de cal superiores a 15%, a Absorção de Água por Imersão sobe consideravelmente, mantendo-se aproximadamente constante para as amostras com incrementos de 15 e 20% de cal, diminuindo na amostra CV60CH25%.

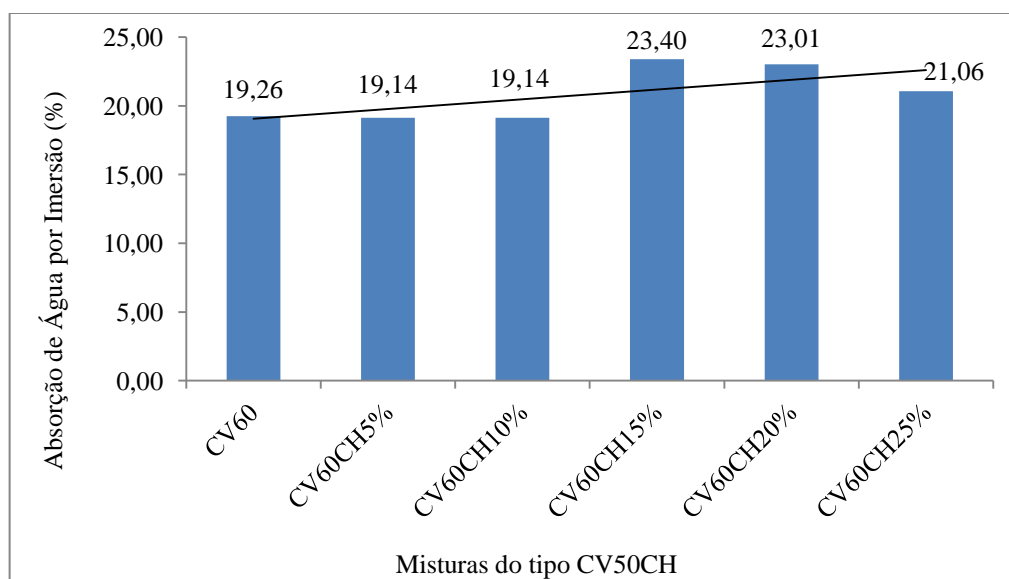


Figura 31- Absorção de Água por Imersão das misturas do tipo CV50CH

Estes resultados estão de acordo com o sucedido para as misturas com Cimento, Cinzas volantes e Metacaulino, sendo de esperar uma explicação associada aos resultados verificados, do mesmo tipo.

No contexto desta explicação, a mistura CV60CH20% e a mistura CV60CH25%, apresentam uma diminuição da Absorção de Água por Imersão, comparativamente com a mistura CV60CH15%; em desacordo com o esperado.

### 5.3.3 Absorção de Água por Capilaridade

O ensaio realizado à Absorção de Água por Capilaridade teve por base o procedimento associado a este mesmo ensaio realizado para as misturas com incorporação do Metacaulino.

A Absorção de Água por Capilaridade pode ser analisada através da curva que relaciona a quantidade de água absorvida em função do tempo e do Coeficiente de Capilaridade.

Na Figura 32, pode-se observar a Absorção Capilar das misturas constituídas por Cimento e Cinzas volantes, nos primeiros 2 dias de pesagens.

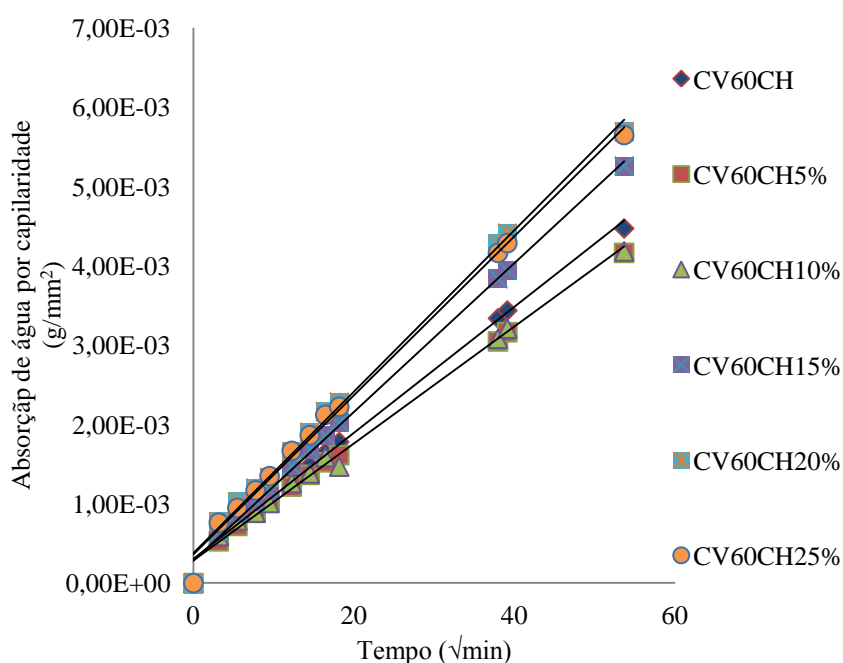


Figura 32- Evolução da absorção capilar, pesagens efetuadas nos 2 primeiros dias para as misturas sem Metacaulino

O coeficiente de absorção capilar presente na Figura 33 foi calculado através do declive da reta da Absorção de Água por Capilaridade, por unidade de superfície /  $\sqrt{\text{min}}$ , nos intervalos de tempo (10min-90min).

O ensaio da Absorção de Água por Capilaridade realizado às misturas do tipo CV50CH possibilitou observar um ligeiro crescimento do Coeficiente de Capilaridade em função do incremento crescente de hidróxido de cálcio, com exceção da amostra CV50CH10%, de acordo com a Figura 33.

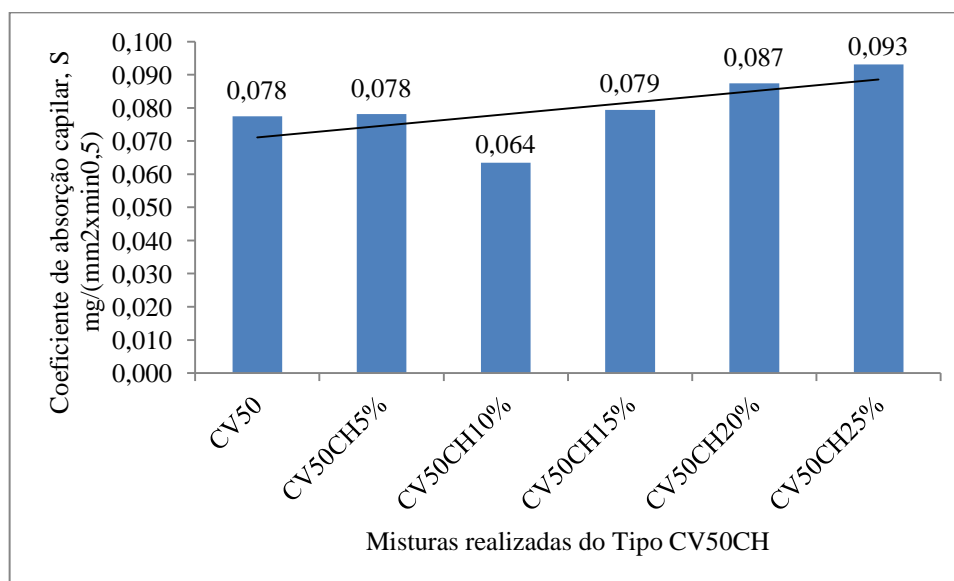


Figura 33- Coeficiente de Absorção de Absorção de Água por Capilaridade, misturas CV50CH

É importante realçar que as variações dos Coeficientes de Absorção por Capilaridade das misturas realizadas são reduzidas. Esta variação do Coeficiente de Capilaridade pode estar simplesmente associada à quebra dos prismas em duas partes, de acordo com o procedimento realizado. Este procedimento origina uma seção transversal sinuosa, que gera uma superfície de contato, provete/água não uniforme. Esta não uniformidade pode originar resultados diferentes tendo em conta apenas este aspeto.

Estes resultados em harmonia com os resultados inerentes à Absorção de Água por Imersão apontam para um aumento da porosidade intersticial e para um aumento ligeiro do diâmetro dos poros já existentes. O aumento dos poros parece aumentar com a adição de cal tal como a porosidade.

Browne (1991), relaciona o Coeficiente de absorção capilar expresso em  $\text{mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min}^{0,5})$ , com a classe de qualidade do betão, de acordo com a Tabela 37.

De acordo com este autor, adaptando o seu raciocínio a matrizes cimentícias, com objetivo de as classificar relativamente à sua classe de qualidade, todas as misturas deste tipo, apresentam qualidade elevada.



### 5.3.4 Carbonatação

O ensaio à Carbonatação para as misturas com substituição de cimento por cinzas volantes, tal como para as amostras com metacaulino, através de várias medições da profundidade de carbonatação para cada amassadura, aos 7, 14 e 28 dias, permitiu determinar o Coeficiente de Carbonatação que está representado na Figura 34.

Através da Figura 24, os resultados obtidos permitem verifica-se que a incorporação de cal, aumenta a resistência à Carbonatação independentemente da percentagem de cal adicionada.

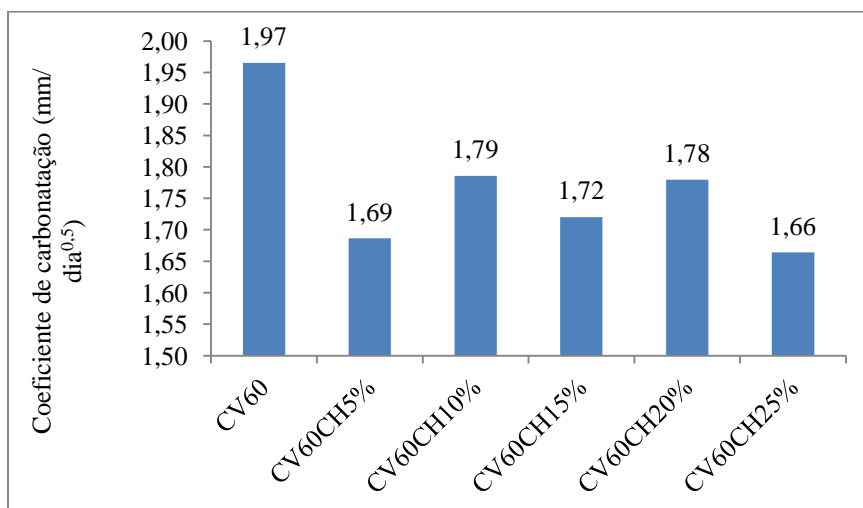


Figura 34- Coeficiente de Carbonatação das misturas sem metacaulino

## 5.4 Ensaio estado endurecido, análise comparativa entre os compósitos com e sem Metacaulino

### 5.4.1 Compressão

Através da análise individual de ambos os tipos de misturas realizadas pode-se posteriormente efetuar uma análise comparativa entre elas, avaliando assim aspetos comparativos da sua

evolução de resistências à compressão, benefícios da utilização da cal comparativamente as suas Amostras Padrão, e por último, pode-se avaliar o benefício que trazem os diferentes minerais, substitutos do Cimento, para a matriz cimentícia em questão.

Relativamente a incorporação de cal, relativamente a amostra padrão, a composição M20CV50CH, apresenta maiores benefícios, apresentando duas composições valores superiores a resistência à compressão em idades relativamente mais jovens, enquanto as misturas que na sua composição estavam na ausência do Metacaulino apenas apresentaram composições superiores a amostra padrão perto da última idade de ensaio (90 dias).

Tal facto deve-se ao Metacaulino ser mais reativo que as Cinzas volantes e a sua reatividade iniciar-se em idades mais jovens, enquanto as cinzas, não sendo tão reativas, a sua reatividade dá-se mais tarde, fazendo com que apenas uma amostra ultrapassa-se a amostra padrão numa idade muito próxima à última idade de ensaio.

Relativamente à grandeza numérica associada aos valores obtidos, as amostra que na sua composição não incorporam Metacaulino, apresentam valores superiores em idades mais jovens e em idades mais avançadas. Estes valores podem estar associados a na sua composição apresentarem maior percentagem de Cimento, beneficiando assim da reação pozolânica em idades mais avançadas devido às Cinzas volantes, e possuem na sua constituição maior percentagem de Cimento, material dotado por excelência de elevadas características mecânicas.

Em ambas os tipos de matrizes cimentícias, espera-se uma evolução crescente da resistência à compressão, relativamente à amostra padrão em idades mais avançadas.

#### **5.4.2 Absorção de Água por Imersão à pressão atmosférica**

Através de uma comparação global dos compósitos realizadas, relativamente à Absorção de Água por Imersão, as misturas do tipo CV50CH, apresentaram menores Absorções de Água por imersão. A diferença entre as Absorções de Água por Imersão é notória para as misturas com incorporação de cal inferiores a 15% e para a mistura com 25% de incorporação de cal. As restantes misturas obtiveram Absorções de Água por imersão semelhantes.

Os constituintes empregues nos compósitos em questão, anteviam diferentes resultados. A mistura M20CV50CH, com a incorporação do Metacaulino, previa uma reação pozolânica mais coesa, procedendo-se a uma maior refinação dos poros, diminuindo a porosidade diminuindo assim, comparativamente a Absorção de Água por Imersão.

A Figura 35 é referente à Absorção por Imersão comparativa das misturas com e sem MtK.

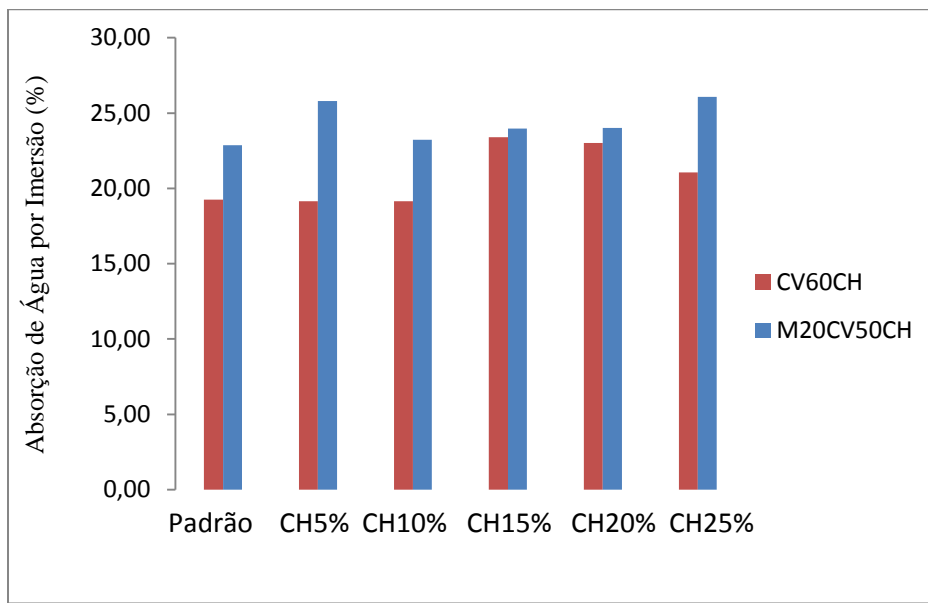


Figura 35- Absorção de Água por Imersão das misturas CV60CH e M20CV50CH

### 5.4.3 Absorção por capilaridade

Comparando todas as misturas realizadas, relativamente ao Coeficiente de Absorção Capilar, S, as misturas do tipo CV50CH, apresentaram menores Coeficientes de Absorção Capilar para percentagens de cal inferiores a 20% da massa do respetivo ligante. Para as misturas com 20 e 25% de cal, os resultados do Coeficiente de Capilaridade são próximos para ambas as misturas (Figura 36).

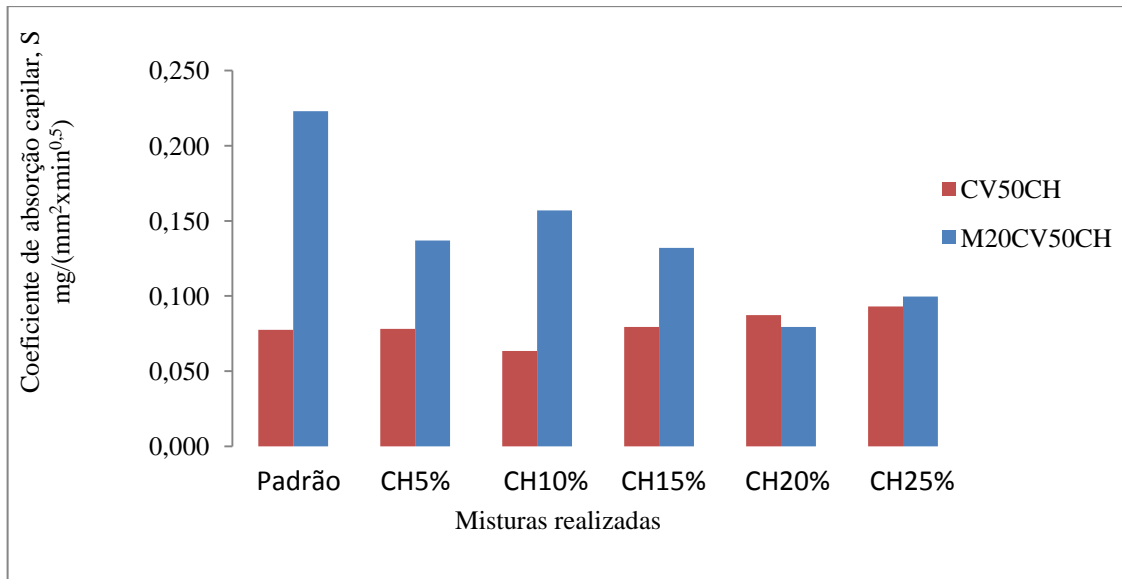


Figura 36- Coeficiente de Absorção Capilar das misturas CV50CH e M20CV50CH

Estes resultados beneficiam as amostras CV50CH, comparativamente às amostras M20CV50CH. As amostras que na sua constituição contêm Metacaulino anteviam menores Coeficientes de Capilaridade, através da justificação expressa em 5.4.2.

## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 Apreciações Gerais

Esta dissertação tem como objetivo principal analisar o efeito da incorporação de cal como ativador da reação pozolânica, avaliando o desempenho da cal em misturas com quantidades reduzidas de Cimento. Para este efeito efetuaram-se diversos ensaios para avaliar as diferentes resistências das misturas cimentícias (seus benefícios e inconvenientes), analisando a resistência a fatores variados como, resistência a compressão, resistência à carbonatação e a absorção de água por capilaridade e, também, por imersão.

Uma avaliação do efeito da incorporação da cal como ativador da reação pozolânica pretende com isso, estimar a quantidade de hidróxido de cálcio ideal, como adição em massa percentual relativamente à massa do ligante, para a realização da reação pozolânica em estudo, maximizando-se assim os benefícios aderentes a este processo.

Os resultados dos ensaios efetuados permitem concluir que, para as composições que na sua constituição contêm Cimento, Cinzas volantes e Metacaulino, a adição de Cal aumentou a resistência à compressão para misturas com 10 e 15% de adição de cal e diminuiu esta resistência para adições de cal superiores a 15%. Tendo em conta anomalias em termos de resultados observados para a mistura com 5% de incremento de cal, à resistência à compressão, à resistência à carbonatação e à Absorção de Água por Imersão, o ensaio à resistência à compressão realizado nesta dissertação, antevê uma evolução das resistências à compressão para percentagens de adição de cal até 15%, sendo a mistura que continha 15% de cal a que obteve maiores benefícios relativamente a este ensaio.

Relativamente à absorção de água por imersão, nas misturas com Metacaulino, a incorporação crescente de cal provocou um aumento da porosidade aberta das composições. Este aumento sugere um aumento da porosidade intersticial em função do incremento crescente na cal nas misturas realizadas. Contudo, complementarmente, os ensaios de absorção de água por capilaridade realizados, estes resultaram na diminuição do coeficiente de capilaridade, S, em

função da adição crescente de cal, o que, aparentemente, indica que a adição de cal aumenta o número de vazios mas diminui a sua dimensão.

A resistência à carbonatação das misturas ternárias, aumentou para incorporações de Cal até 15%, relativamente à amostra Padrão. Para adições superiores a 15% a resistência à compressão apresentou-se inferior à da amostra Padrão.

Tendo em conta o objetivo desta dissertação, relativamente à mistura ternária a percentagem de cal ideal antevê-se cerca de 15%, com pequena margem de variação no sentido decrescente relativamente ao incremento da cal. Esta adição, comparativamente com a amostra Padrão, no contexto evolutivo e no enquadramento destes ensaios, em relação a todas as misturas ternárias, aumentou as resistências à compressão para idades superiores a, aproximadamente, 15 dias, diminuiu a resistência à carbonatação e, embora a sua porosidade aberta tenha aumentado, tudo indica que a dimensão dos poros deve ter diminuído.

Nos compósitos constituído por Cimento e Cinzas volantes, a adição de cal, em geral, proporcionou a obtenção de resistências à compressão inferiores à da mistura Padrão. As resistências à compressão destas misturas apresentaram-se cada vez mais próximos ao longo da idade da amassadura padrão, sendo apenas superada para duas matrizes cimentícias numa idade avançada, próxima da última idade de ensaio (90 dias). É importante realçar que a mistura com 25% de cal, uma das duas misturas que apresentou resultados da resistência à compressão superiores à da mistura Padrão, contudo apresentou-se sinuosa e sem grande coerência quanto aos seus resultados obtidos. Desprezando esta amostra anómala, este trabalho experimental evidenciou uma diminuição da resistência à compressão com o incremento da adição de cal. Prevê-se, contudo, uma evolução bastante progressiva das resistências à compressão dos compósitos com incorporação de cal com tendência às amostras com percentagem de cal inferiores a 10% superarem os resultados obtidos pela mistura Padrão no decorrer do tempo.

A Absorção de água por imersão e a absorção de água por capilaridade, para as matrizes cimentícias sem Metacaulino, permitiu constatar um possível aumento da porosidade em função da adição da cal. Estas observações são mais perceptíveis para adições superiores a 10%. Contudo, os resultados não fogem muito dos resultados obtidos para a amostra padrão sendo estes resultados quase constantes para incorporações de cal até 10%.

Relativamente à resistência à carbonatação, a adição de cal para misturas com substituição de cimento por cinzas volantes, foi responsável por um aumento da resistência à Carbonatação, independentemente do teor de cal adicionada.

Tendo em conta um dos objetivos principais deste trabalho, para a mistura com Cimento e Cinzas volantes a percentagem que se antevê ideal, é próxima de 5%. Contudo, o incremento da cal apenas apresentou benefícios para médios e longos períodos de tempo após a realização das misturas.

Comparando os resultados obtidos pelas misturas ternárias com as misturas de Cimento e Cinzas volantes, verificamos que a incorporação da Cal apresentou, relativamente à Mistura Padrão, melhores benefícios à compressão sendo a amostra Padrão do compósito ternário ultrapassada num idade inferior à qual a amostra Padrão das misturas com Cimento e Cinzas volantes foi alcançada e superada.

Relativamente ao ensaio da Absorção de Água por Imersão e Capilaridade ambas as misturas sugerem um aumento da Porosidade, embora a mistura com Metacaulino apresente resultados relativamente mais elevados, relativamente a estes ensaios. Estes resultados não eram esperados. O Metacaulino era de esperar que fosse um material mais reativo que as Cinzas volantes e a sua incorporação associada à incorporação da cal devia diminuir a porosidade relativamente as amassaduras só com Cinzas volantes resultado que não foi verificado. Assim, fica a dúvida acerca da qualidade do Metacaulino usado que não permitiu obter os resultados esperados.

## 6.2 Trabalhos Futuros

A reação pozolânica é uma reação que se desenvolve ao longo do tempo. Sendo este trabalho experimental desenvolvido ao longo de um semestre, a sua curta duração não permitiu caraterizar por completo a evolução da reação pozolânica ao longo do tempo, bem como os eventuais benefícios associados.

Um trabalho futuro pressagiar-se-ia interessante se permitir quantificar a sua evolução ao longo do tempo, através da continuação destes ensaios em idades superiores.

Outro ponto que seria interessante de avaliar seria a criação de amassaduras de betão com o traço utilizado neste trabalho experimental. As amassaduras originárias deveriam ser constituídas de acordo com as amassaduras mais benéficas, relativamente aos ensaios protagonizados obtidas nesta dissertação. O objetivo deste trabalho era comprovar os resultados obtidos nesta dissertação.



## 7 BIBLIOGRAFIA

Agostinho, C. S. A. (2008). *Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal aérea*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa.

Azevedo, A. F. L. C. (2002). Betões de elevado desempenho com incorporações de Cinzas volantes. *Dissertação de Doutoramento*. Escola de Engenharia, Universidade do Minho.

BASF, The Chemical Company. Glenium Sky 617. Ficha Técnica, 2011.

Botas, S. M. S. (2009). *Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios*. *Dissertação de Mestrado*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

British Standard EN 1015 (1999). Methods of teste for mortar for masonry – Part 11: determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. London. BSI.

British Standard EN 1015 (2002). Methods of teste for mortar for masonry – Part 18: determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. London. BSSI.

Cadore, W. W. (2008). *Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

Camões, A. (2011). *Betão eco-eficiente com reduzido teor de Cimento*. C-TAC, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil. Acedido 6 de Julho de 2012, em <http://hdl.handle.net/1822/15304>

Carneiro, J. P. M. N. (2012). *Caracterização de argamassas de cal hidratada natural com Metacaulino*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

Çavdar, A.; Yetgin, S. (2007). *Availability of tuffs from northeast of Turkey as natural pozzolan on cement, some chemical and mechanical relationships*. Construction and Building Materials. 21, 2066-2071.

Coelho, A. D. V. S (2007). *Betão com incorporação de elevadas percentagens de Cinzas volantes*. Dissertação de Doutoramento. Universidade Técnica de Lisboa.

Coutinho, A. S. (1958). *Pzolanas, betões com pozolanas e Cimentos pozolânicos*. Lisboa, LNEC.

Coutinho, A. S. (1988). *Fabrico e Propriedades do Betão*, Volume I - Propriedades das matérias-primas; Volume II- Fabrico.

European Standard EN 1015-3 (1999). *Methods of teste for mortar for for masonry – Part 3: determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. Brussels. CEN.

Figueiredo, C. D. P. (2011). *O papel do Metacaulino na proteção do betão contra a ação dos cloretos*. Dissertação de mestrado, Universidade de Aveiro.

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

Gibbs, P. (1997) *Pozzolans for lime mortars. The building Conservation*. Acedido em 8 de Julho de 2012, em [www.buildingconservation.com](http://www.buildingconservation.com).

Hoppe, J. F (2008). *Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto*. Dissertação de doutoramento, Universidade de São Paulo.

Laboratório de engenharia Civil. Documentação normativa especificação LNEC (1999). *Betões: determinação da Absorção de Água por Imersão. Ensaio à pressão à pressão atmosférica*. LNEC.

Luxan, M. P.; Madruga, F.; Saavedra, J. (1989). *Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement, cement and concrete research*. Elsevier, 19, p. 63-68.

Mendonça, B. V. (2007). *Estudo do desempenho das Argamassas Hidráulicas*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa.

Netto, R. M. (2006). *Materiais Pozolânicos*. Curso de especialização em construção civil, Escola de Engenharia da UFMG.

Norma Portuguesa 4220 (1993). Pozolanas para betão. IPQ.

Norma Portuguesa EN 196-1 (2006). Métodos de ensaio de Cimentos: Parte 1: determinação das resistências mecânicas. IPQ.

Pinto, A. T. (2004). *Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina do Metacaulino*. Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho.

Pontes, J. M. P. N. (2011). *Reactividade de Pozolanas para Argamassas e Betões*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

Proença, A. M. (2004). *Construção com novos materiais: Betões especiais*. Sebenta de Materiais. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

Rojas, M. F. (2006). *Study of hydrated phases present in MK-lime system cured at 60°C and 60 months of the reaction*. Cement and Concrete Research. 36, 827-831.

Secil, Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A. CEM I 42,5R-Cimento Portland versão 3, 2004

Velosa, A. L. P. L. (2006). *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas*. Dissertação de Doutoramento. Secção autónoma de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.

Vireia, J. P. (2010) *Interação Cimento – Superplastificante*. Avaliação da estabilidade do comportamento. Dissertação de mestrado. Universidade Técnica de Lisboa.