



Luís Miguel do Nascimento Madalena
Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Influência do teor em pozolana na reatividade e nas características mecânicas de argamassas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: António Santos Silva, Investigador Auxiliar, LNEC
Co-orientadora: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Associada, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Válder José da Guia Lúcio
Arguente: Prof^a. Doutora Cristina Borges
Vogais: Doutor António Santos Silva
Prof^a. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho 2013

“Copyright” Luís Miguel do Nascimento Madalena, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Ao Doutor António Santos Silva, Investigador Auxiliar no NMM/DM do LNEC, orientador científico deste trabalho, um sincero obrigado pelo apoio constante que prestou, pela persistente transmissão de conhecimentos e incentivo, pelo rigor exigido e pela acessibilidade e simpatia que sempre demonstrou.

À Professora Doutora Paulina Faria, coorientadora da presente dissertação, o reconhecimento por toda a orientação, ajuda e disponibilidade prestada.

À Engenheira técnica Luzia Barracha e ao André Gameiro, gostaria de agradecer por todo o seu apoio e dedicação, ao longo do meu estudo realizado no laboratório NMM do LNEC.

A todos os técnicos do Núcleo de Materiais Metálicos e do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do LNEC, gostaria de agradecer por toda a ajuda prestada na elaboração dos diferentes ensaios.

Aos meus colegas e amigos, pela partilha de conhecimentos e espírito de equipa.

À Inês Carpinteiro, por me acompanhar ao longo deste percurso, no qual sempre me apoiou, sendo determinante em alguns momentos.

A toda a minha família, com especial atenção para os meus pais, Luís José Madalena e Ana Maria Madalena, por me proporcionarem a possibilidade de realizar este percurso académico, pela paciência sempre presente, pelo incentivo, apoio e compreensão ao longo os anos.

RESUMO

A utilização de materiais ricos em sílica e/ou alumina de grande superfície específica, denominados de pozolanas, em argamassas e betões na quantidade adequada, contribuem para a melhoria das suas características, tais como as resistências mecânicas e a durabilidade.

A reatividade pozolânica é definida pela capacidade que a pozolana tem em se combinar com o hidróxido de cálcio, presente na cal ou no cimento, e pode ser determinada por diferentes métodos.

Foram realizadas e estudadas um conjunto de composições de argamassas que possibilitaram a análise da influência das adições pozolânicas em diferentes teores, tendo sido comparadas as resistências mecânicas aos 28 e 90 dias com a argamassa de referência, sem pozolana. Como materiais pozolânicos foram utilizados o metacaulino, as cinzas de biomassa e o pó de vidro, sendo os ligantes o cimento Portland CEM 1 - 42,5R e a cal aérea hidratada em pó. A reatividade entre os ligantes e as pozolanas foi caracterizada através dos ensaios químicos Chapelle e Fratini e pelo ensaio do índice de atividade.

Este estudo visa demonstrar a influência da adição de pozolanas em diferentes teores para cada um dos ensaios realizados e aferir a correlação entre eles.

Com base nos resultados, as principais conclusões, detalhadas ao longo da tese, são que o ensaio de Chapelle é o mais indicado para caracterizar a reatividade entre as pozolanas e a cal aérea, permitindo estabelecer a relação com as resistências mecânicas para diferentes pozolanas; o ensaio de Fratini permite determinar a pozolanidade de misturas de cimento com diferentes teores de pozolana mas, no entanto, os resultados obtidos neste tipo de ensaio não se correlacionam com os resultados obtidos pelos outros tipos de ensaios; o índice de atividade é o mais indicado para caracterizar argamassas com diferentes teores de pozolana pela determinação da resistência mecânica.

Palavras-chave:

Pozolana, Cimento Portland, Cal aérea, Ensaio de reatividade pozolânica

ABSTRACT

The use of pozzolans, which are materials rich in silica and alumina, with high specific surface, in the right quantities on lime and cement mortars enhances some of its characteristics, such as the mechanical resistance and durability. The pozzolanic activity is defined by the ability to combine pozzolan and calcium hydroxide. It can be determined by different methods. Calcium hydroxide can be found both in lime and cement.

Several compositions of mortar were made to analyze the influence in adding different degrees of pozzolans. Its mechanical resistance at the end of 28 and 90 days was compared with the reference mortar. The pozzolanic materials used were metakaolin, biomass fly ash and glass powder. The binders were Portland cement CEM I - 42,5R and hydrated air lime. Chapelle, Fratini and strength activity index tests were conducted to measure the reactivity between the binders and pozzolans.

This work assesses the influence of adding pozzolan in different quantities through each method and the correlation between the different methods.

Based on the results, the main conclusions are that the Chapelle test is the most adequate to characterize the reactivity between pozzolan and air lime, allowing to establish a link with mechanical resistance for different pozzolans; the Fratini test determines the pozzolanicity of cement after the addition of different quantities of pozzolan but, however, the results obtained did not correlate with the ones found using the other tests; the strength activity index is the most adequate to characterize mortar with different quantities of pozzolan by measuring the mechanical resistance.

Keywords: Pozzolan, Portland cement, Air lime, Pozzolanic activity test

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação e Objetivo do Trabalho	2
1.3 Organização da dissertação	2
2. ESTADO DO CONHECIMENTO.....	3
2.1 Matérias-primas	3
2.1.1 Ligantes	3
2.1.1.1 Cal aérea	3
2.1.1.2 Cal Hidráulica	4
2.1.1.3 Cimento Portland.....	5
2.1.2 Materiais pozolânicos	5
2.1.2.1 Pozolanas Naturais	7
2.1.2.2 Pozolanas Artificiais	8
2.1.3 Agregados / Areias	12
2.2 Argamassas Pozolânicas	13
2.3 Reatividade Pozolânica	15
2.4 Métodos de ensaio para avaliação da reatividade pozolânica	16
2.4.1 Ensaio de Chapelle modificado.....	17
2.4.2 Ensaio de Frattini.....	18
2.4.3 Índice de atividade.....	19
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	21
3.1 Materiais	21
3.1.1 Agregados	21
3.1.2 Ligantes	23
3.1.3 Pozolanas.....	24
3.2 Ensaio de caracterização dos materiais e da reatividade pozolânica	25
3.2.1 Baridade	25
3.2.2 Ensaio de Chapelle modificado.....	26
3.2.3 Ensaio de Fratini.....	28
3.2.4 Índice de Atividade	31
3.2.4.1 Planeamento das argamassas e amassaduras	31
3.2.4.2 Consistência por espalhamento	33

3.2.4.3 Realização dos provetes e condições de cura	34
3.2.4.4 Resistência à flexão e à compressão.....	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1 Resultados individuais de cada ensaio.....	39
4.1.1 Ensaio de Chapelle	39
4.1.2 Ensaio de Fratini.....	40
4.1.3 Resistências Mecânicas à flexão e compressão	42
4.1.3.1 Argamassas de cimento Portland	43
4.1.3.2 Argamassas de cal aérea.....	45
4.1.4 Índice de Atividade	48
4.1.4.1 Argamassas de cimento Portland e pozolanas	48
4.1.4.2 Argamassas de cal aérea e pozolanas	50
4.2 Resultados comparativos entre ensaios.....	53
4.2.1 Chapelle Vs Fratini	53
4.2.2 Chapelle Vs Índice de Atividade.....	56
4.2.3 Frattini Vs Índice de Atividade	58
4.3 Avaliação da reatividade pozolânica dos materiais analisados	63
5. CONCLUSÃO	67
5.1 Considerações Finais	67
5.2 Desenvolvimentos Futuros	68
6. BIBLIOGRAFIA	69
7. ANEXOS.....	75
ANEXO I – DRX da mistura de areias.....	75
ANEXO II – DRX do metacaulino.....	76
ANEXO III – Ficha técnica do cimento Portland.....	77
ANEXO IV – Ficha técnica da cal aérea	78
ANEXO V – Ficha técnica do metacaulino.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Organização das pozolanas (adaptado de Massazza [1993])	6
Figura 2.2 - Montagem do ensaio de Chappelle adaptado de NF P 18-513 (2009).....	17
Figura 2.3 - Diagrama para a determinação da pozolanicidade segundo a NP EN 196-5.....	19
Figura 3.1 - Areias utilizadas.....	22
Figura 3.2 - Curva granulométrica das areias e da respectiva mistura.....	22
Figura 3.3 - Peneiração a jato de ar.....	24
Figura 3.4 – Filtragem.....	27
Figura 3.5 – Montagem do ensaio de Chappelle.....	27
Figura 3.6 - Titulação ácido-base.....	27
Figura 3.7 – Reagentes usados no ensaio de Fratini: HCl a 0,1M, EDTA a 0,03M, solução de hidróxido de sódio e indicadores de alaranjado de metilo e de calcon.....	29
Figura 3.8 – Determinação da concentração de OH ⁻ no ensaio de Fratini antes e após da titulação...29	29
Figura 3.9 – Determinação da concentração de CaO no ensaio de Fratini: solução antes e após a titulação.....	30
Figura 3.10 - Misturadora mecânica.....	33
Figura 3.11 – Determinação da consistência por espalhamento: imagem antes e depois das 15 quedas.....	33
Figura 3.12 - Conservação do molde em saco de polietileno fechado.....	34
Figura 3.13 - Provetes de argamassa identificados e guardados em sala climatizada.....	35
Figura 3.15 - Ensaio de determinação de resistência à flexão.....	36
Figura 3.16 - Ensaio de resistência à compressão.....	37
Figura 4.1 - Resultados obtidos no ensaio de Chappelle e comparação do consumo de cal com valor de referência da norma NF P 18-513.....	39
Figura 4.2 - Resultados do ensaio de Fratini para misturas de cimento com pó de vidro (PV) ou cinzas de biomassa (CB).....	41
Figura 4.3 – Resultados do ensaio de Fratini para misturas de cimento com metacaulino (MK).....	42
Figura 4.4 – Evolução com a idade das resistências mecânicas de argamassas de cimento Portland e cinzas de biomassa.....	44
Figura 4.5 – Evolução com a idade das resistências mecânicas de argamassas cimento Portland e metacaulino.....	44
Figura 4.6 – Evolução com a idade das resistências mecânicas de argamassas de cimento Portland e pó de vidro.....	45
Figura 4.7 Evolução com idade das resistências mecânicas de argamassas de cal aérea e cinzas de biomassa.....	47
Figura 4.8 – Evolução com a idade das resistências mecânicas de argamassas de cal aérea e metacaulino.....	47
Figura 4.9 - Resistências mecânicas das argamassas de cal aérea e pó de vidro.....	48

Figura 4.10 - Resultado do índice de atividade aos 28 dias das argamassas de cimento Portland com diferentes teores de pozolana.	49
Figura 4.11 - Resultado do índice de atividade aos 90 dias das argamassas de cimento Portland com diferentes teores de pozolana.	50
Figura 4.12 - Resultados do Índice de atividade aos 28 dias das argamassas de cal aérea com diferentes teores de pozolana.	52
Figura 4.13 - Resultados do Índice de atividade aos 90 dias das argamassas de cal aérea com diferentes teores de pozolana.	52
Figura 4.14 - Relação entre o consumo de portlandite no ensaio de Chapelle e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) em cimentos com 10% de teor em pozolana, aos 8 dias no ensaio de Fratini.	54
Figura 4.15 - Relação entre o consumo de portlandite no ensaio de Chapelle e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) em cimentos com 30% de teor em pozolana, aos 8 dias no ensaio de Fratini.	54
Figura 4.16 - Relação entre o consumo de portlandite no ensaio de Chapelle e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) em cimentos com 50% de teor em pozolana, aos 8 dias no ensaio de Fratini.	55
Figura 4.17 - Relação entre o consumo de portlandite no ensaio de Chapelle e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 15 dias no ensaio de Fratini.	56
Figura 4.18 - Relação entre o consumo de cal no ensaio de Chapelle e o IA aos 28 dias das argamassas de cimento.	56
Figura 4.19 - Relação entre o consumo de cal no ensaio de Chapelle e o IA aos 90 dias das argamassas de cimento.	57
Figura 4.20 - Relação entre o consumo de cal no ensaio de Chapelle e o IA aos 28 dias das argamassas de cal aérea.	57
Figura 4.21 - Relação entre o consumo de cal no ensaio de Chapelle e o IA aos 90 dias das argamassas de cal aérea.	58
Figura 4.22 – Relação para as cinzas de biomassa entre o consumo de Portlandite no ensaio de IA de argamassas de cimento e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 8 dias no ensaio de Fratini.	59
Figura 4.23 – Relação para o metacaulino entre o consumo de portlandite no ensaio de IA de argamassas de cimento e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 8 dias no ensaio de Fratini.	59
Figura 4.24 – Relação para o pó de vidro entre o consumo de portlandite no ensaio de IA de argamassas de cimento e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 8 dias no ensaio de Fratini.	60
Figura 4.25 – Relação para as cinzas de biomassa e pó de vidro entre o consumo de portlandite no ensaio de IA de argamassas de cimento e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 15 dias no ensaio de Fratini.	61

Figura 4.26 – Relação para as cinzas de biomassa entre o consumo de portlandite no ensaio de IA de argamassas de cal aérea e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 8 dias no ensaio de Fratini.	61
Figura 4.27- Relação para o metacaulino entre o consumo de portlandite no ensaio de IA (argamassas de cal aérea) e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 8 dias no ensaio de Fratini.	62
Figura 4.28- Relação para o pó de vidro entre o consumo de portlandite no ensaio de IA (argamassas de cal aérea) e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 8 dias no ensaio de Fratini.	62
Figura 4.29 – Relação para as cinzas de biomassa e o pó de vidro entre o consumo de portlandite no ensaio de IA de argamassas de cal aérea e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 15 dias no ensaio de Fratini.	63

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Materiais utilizados e sua designação.	21
Quadro 3.2 - Composição química da cal aérea (% em massa) [Gameiro et al., 2012]	23
Quadro 3.3 - Requisitos químicos da cal cálcica (valores característicos) [IPQ,2011]	23
Quadro 3.4 - Características químicas do cimento Portland CEM I 42,5R.	23
Quadro 3.5 - Composição química dos materiais pozolânicos.	24
Quadro 3.6 - Composição mineralógica dos materiais pozolânicos.	25
Quadro 3.7 - Baridade dos materiais utilizados.	26
Quadro 3.8 -Designação das argamassas, quantidades dos constituintes, traço ponderal e razão água/ligante.	32
Quadro 3.9 - Espalhamento médio das argamassas.	34
Quadro 4.1- Resultados obtidos no ensaio de Chapelle.	39
Quadro 4.2 - Resultados do ensaio de Fratini aos 8 dias	40
Quadro 4.3 - Resultados do ensaio de Fratini aos 15 dias.	40
Quadro 4.4 – Valores de resistência à compressão e à flexão para argamassas de cimento Portland com diferentes tipos e teores de pozolana.	43
Quadro 4.5 – Valores de resistência à compressão e à flexão para argamassas de cal aérea com diferentes tipos e teores de pozolana.	46
Quadro 4.6 - Resultados do Índice de Atividade para as argamassas de cimento Portland.	49
Quadro 4.7 - Resultados do Índice de Atividade para as argamassas de cal aérea.	51
Quadro 4.8 – Consumo de portlandite no ensaio de Chapelle Vs concentrações do íão hidroxilo e de óxido de cálcio no ensaio de Fratini aos 8 dias.	53
Quadro 4.9 – Classificação da reatividade dos materiais, segundo o ensaio Chapelle.	63
Quadro 4.10 – Classificação das misturas de cimento e pozolana, segundo o ensaio Fratini.	64
Quadro 4.11 – Argamassas classificadas como pozolânicas, segundo o índice de atividade.	64

Simbologia de materiais, argamassas, ensaios e determinações

Abreviaturas

EN – European Standard

IPQ – Instituto Português da Qualidade

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Materiais

APAS 12 – Areia de granulometria grossa

APAS 20 – Areia de granulometria intermédia

APAS 30 – Areia de granulometria fina

CB – Cinzas de Biomassa

MK- Metacaulino

PV – Pó de vidro

CL – Cal aérea

CP – Cimento Portland

EDTA – Ácido Etilenodiamino Tetra-acético

Ensaio e parâmetros

RI – Resíduo insolúvel

PF – Perda ao fogo

DRX – Difração de raios X

CV – Coeficiente de variação

DP – Desvio padrão

CAH – Aluminato de cálcio hidratado

CSH – Silicato de cálcio hidratado

CASH – Sílico-aluminato de cálcio hidratado

Rc – Resistência à compressão

Rf – Resistência à flexão

IA – Índice de Atividade

Argamassas de cal aérea

CL – Argamassa de cal aérea hidratada e areia com traço volumétrico 1:3.

CL_XCB – Idem, com substituição de X% da massa de cal por cinzas de biomassa.

CL_XMK - Idem, com substituição de X% da massa de cal por metacaulino.

CL_XPV - Idem, com substituição de X% da massa de cal por pó de vidro.

Argamassas de cimento Portland

CP – Argamassa de cimento Portland e areia com traço volumétrico 1:3.

CP_XCB – Idem, com substituição de X% da massa por cinzas de biomassa.

CP_XMK – Idem, com substituição de X% da massa por cinzas de metacaulino.

CP_XPV – Idem, com substituição de X% da massa por cinzas de pó de vidro.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A construção acompanha a evolução humana, o que motivou que o Homem tenha sempre procurado, ou desenvolvido, materiais que lhe permitissem construir abrigos, edificações e estruturas várias

Nesses desenvolvimentos e recuos surgiram as pozolanas naturais que foram incorporadas nas argamassas de cal, e que marcaram as antigas civilizações gregas e romanas. Segundo alguns autores [Jalali,1991; Malhotra et al., 1996; Moropoulou et al.,2004; Lancaster,2005], os mais importantes monumentos históricos foram construídos utilizando ligantes pozolânicos.

Originalmente o termo pozolana era associado às cinzas vulcânicas e às rochas calcinadas, que só por si não apresentam características cimentícias; no entanto, na presença de humidade reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura e pressão ambiente, originando componentes com propriedades aglomerantes. Esta definição tem vindo a ser estendida também a materiais inorgânicos com elevada superfície específica, de composição siliciosa ou sílico-aluminosa [ASTM, 2007; Sabir *et al.*, 2001] que apresentem reatividade pozolânica.

A indústria da construção utiliza o cimento como principal constituinte do betão. A produção de cimento origina o consumo elevado de matérias-primas, em particular de marga calcária, provocando ainda a libertação de quantidades elevadas de gases com efeito de estufa (dióxido de carbono) para a atmosfera [Cheah *et al.*, 2012]. Vários estudos revelam que por cada tonelada de cimento produzida são libertadas para a atmosfera entre 0,5 a 1 ton de CO₂ [Malhotra *et al.*, 1996].

As argamassas de cal aérea foram utilizadas durante dois milénios em construções de edifícios e monumentos até que, durante décadas, a sua utilização foi substituída pelo cimento Portland, que possui uma resistência mecânica muito superior e um baixo tempo de presa [Coelho *et al.*, 2009]. Contudo as argamassas que contêm como ligante o cimento Portland não são as mais adequadas para intervenções de reabilitação, pois têm um elevado módulo de elasticidade, que impossibilita o acomodar das deformações das alvenarias, uma baixa permeabilidade ao vapor de água e por vezes incompatibilizam-se a níveis químicos com as argamassas à base de cal [Faria *et al.*, 2011; Gonçalves, 2007; Martinez *et al.*, 2007].

Devido a estes inconvenientes, nas últimas décadas tornou a haver interesse relativo na utilização de argamassas de cal aérea. A adição de pozolanas em argamassas de cal aérea pretende melhorar a rapidez do endurecimento, extremamente lento particularmente em condições de elevada humidade relativa e fraco contacto com dióxido de carbono, e as baixas resistências mecânicas, que são os principais entraves na execução de revestimentos com este material [Freitas *et al.*, 2008]. Com estas argamassas pretende-se que haja melhor compatibilidade química, mecânica e física, de modo aumentar a durabilidade quando aplicadas em paredes existentes [Fragata *et al.*, 2008].

1.2 Motivação e Objetivo do Trabalho

Nas últimas décadas tem-se assistido a um maior interesse pela incorporação de materiais pozolânicos, quer como adição, quer em substituição, do cimento Portland. Em paralelo, tem-se alargado o espectro de materiais naturais e artificiais, com o objetivo de promover o uso mais sustentável dos recursos e em simultâneo contribuir para o desenvolvimento de produtos de construção com características de maior conforto e mais duráveis.

O objetivo principal desta dissertação é a análise da reatividade pozolânica de diferentes pozolanas face ao comportamento mecânico de argamassas de cal aérea e de cimento Portland com essas mesmas pozolanas. Em simultâneo, pretende-se avaliar o método mais adequado para a determinação da reatividade pozolânica de três materiais utilizados como pozolana artificial, no caso um metacaulino, uma cinza de biomassa e um pó de vidro.

1.3 Organização da dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos e anexos. Neste capítulo é apresentado o enquadramento do tema, motivação, objetivo e a estruturação do trabalho.

No segundo capítulo é feita a descrição do conhecimento atual acerca do assunto em estudo nesta dissertação, como as matérias-primas, argamassas, reatividade pozolânica e os principais métodos utilizados para a estudar e caraterizar.

O terceiro capítulo descreve todo o procedimento experimental desenvolvido, onde são caracterizados todos os materiais utilizados, descritas as argamassas e betões realizados, bem como os protocolos utilizados para avaliar a pozolanicidade.

No quarto capítulo são apresentados e analisados todos os resultados obtidos, efetuando comparações e verificando as correlações existentes entre cada ensaio, tal como a avaliação dos materiais estudados.

No quinto capítulo apresentam-se as considerações finais sobre os resultados obtidos para os diferentes métodos e materiais estudados. Neste capítulo são também sugeridos desenvolvimentos e estudos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas e os anexos referenciados ao longo do texto.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1 Matérias-primas

2.1.1 Ligantes

Define-se ligante como o produto que ganha presa, endurece e tem a capacidade de aderir e aglomerar outros materiais.

Segundo Sousa-Coutinho [1988], os ligantes podem-se dividir em hidráulicos, aéreos e orgânicos.

Os ligantes hidráulicos são constituídos por materiais em pó muito fino que, quando misturados com água, formam uma pasta que endurece apenas através da reação química entre o pó e a água. Este tipo de ligantes endurece ao ar e até mesmo quando está imerso. Pertencem a este grupo os cimentos e as cais hidráulicas.

Os ligantes aéreos, por sua vez, endurecem em contacto com o ar. São exemplos de ligantes aéreos a cal aérea e o gesso.

Dos ligantes orgânicos fazem parte os hidrocarbonados, como o alcatrão, asfalto e o betume asfáltico, que são líquidos com alguma viscosidade, endurecem por arrefecimento ou evaporação dos seus solventes.

2.1.1.1 Cal aérea

A cal aérea é um dos ligantes que tem tido uma utilização contínua ao longo dos tempos, pelo menos desde a época Romana até aos dias de hoje [Velosa, 2006].

Segundo a norma NP EN 459-1 [IPQ, 2011], as cais aéreas são constituídas principalmente por óxidos ou hidróxidos de cálcio ou magnésio (CaO/MgO ou $\text{Ca(OH)}_2/\text{Mg(OH)}_2$), e podem ter origem em rochas calcárias ou rochas dolomíticas.

A cal aérea resulta da calcinação de rochas calcárias puras (ou quase puras) com teor de carbonato de cálcio (CaCO_3), ou carbonato de cálcio e magnésio ($\text{CaMg(CO}_3)_2$), superiores a 95% na sua composição [Estrela, 2008; Faria, 2004].

Dependendo do teor de impurezas as cais aéreas podem-se classificar em magras ou gordas. As cais aéreas designam-se de magras quando provêm de calcários com teor entre 1 e 5% de argila ou de outras impurezas, apresentando cor acinzentada, ou de gordas quando resultam da calcinação de rochas calcárias muito puras com percentagem de carbonato de cálcio não inferior a 99% e de cor branca [Faria, 2004].

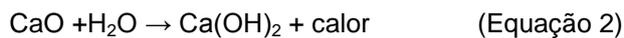
- Calcinação

A calcinação ocorre a temperaturas entre os 800 e 1000°C, altura em que a pressão atmosférica é inferior à pressão do dióxido de carbono no calcário. A estas temperaturas o carbonato de cálcio (CaCO_3) decompõe-se (equação 1) em dióxido de carbono (CO_2), que é libertado para o ar, e em óxido de cálcio (CaO) designado por cal viva [Sousa-Coutinho, 1988].



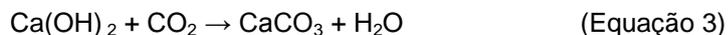
- Hidratação ou Extinção

Dada a instabilidade da cal viva, esta necessita de ser hidratada antes de ser utilizada como material de construção. A hidratação ou extinção resulta da mistura de cal viva com água, criando reações muito exotérmicas e expansivas, podendo atingir temperaturas muito elevadas. Este processo (Equação 2) transforma o óxido de cálcio (CaO) em hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), também conhecido como cal apagada ou cal hidratada [Faria, 2004; Sousa-Coutinho, 2006].



- Carbonatação – Endurecimento

A cal hidratada resultante do processo de extinção é utilizada na preparação de argamassas. Depois da aplicação da argamassa em obra ocorre o processo de endurecimento lento ao ar, por reação com o dióxido de carbono. Quando o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) entra em contacto com o dióxido de carbono existente na atmosfera, ocorre a reação de carbonatação com a formação do carbonato de cálcio e libertação de água (Equação 3). Este processo ocorre de um modo lento e do exterior para o interior, impondo uma certa porosidade, que permita a evaporação da água e a penetração do dióxido de carbono da atmosfera. [Botelho, 2003; Sousa-Coutinho, 2006; Faria, 2004]



2.1.1.2 Cal Hidráulica

A cal hidráulica pode-se dividir em três grupos: cal hidráulica natural (NHL), cal hidráulica (HL) e cal formulada (FL).

Ao grupo das cal hidráulicas naturais NHL pertencem as cal com propriedades hidráulicas obtidas da queima de calcários argilosos ou siliciosos e após a sua redução a pó por extinção, com ou sem moagem, sem quaisquer outros aditivos, e que endurecem por hidratação ou carbonatação.

As cal hidráulicas HL são constituídas por mistura de cal e materiais hidráulicos, como o cimento e pozolanas, e endurecem por hidratação com o contributo do dióxido de carbono.

As cal formuladas FL são cal constituídas por cal cálcica (CL) ou cal hidráulica natural (NHL), a que se junta material hidráulico e que têm a capacidade de endurecer por hidratação ou carbonatação. Este tipo de cal é classificado de acordo com os valores de resistência à compressão em MPa aos 28 dias [IPQ, 2011].

A cal hidráulica natural NHL é produzida a partir da cozedura de calcários (a temperaturas entre os 900°C e 1200°C) com teor máximo de 20% de argilas magras, formando óxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. Com o aquecimento (entre os 400°C e 600°C) a argila decompõe-se em sílica e alumina, que a temperaturas entre os 900 e 1200°C se combinam com o

óxido de cálcio, originando silicato e aluminatos de cálcio [Faria et al., 2012; Faria, 2004]. Tal como para a cal aérea, a NHL necessita ainda de ser extinta com água, para a transformação de óxido de cálcio em hidróxido de cálcio, finalizando assim o seu processo de fabrico. A fase de hidratação dos aluminatos e silicatos de cálcio, é responsável pelo processo de presa e ganho de consistência da argamassa, semelhante à produzida na hidratação do cimento. Com o auxílio do dióxido de carbono atmosférico ocorre o processo de carbonatação, responsável pela modificação da microestrutura, que se manifesta pela alteração das características mecânicas e físicas [Velosa, 2006; Faria, 2004].

2.1.1.3 Cimento Portland

O cimento Portland é um ligante hidráulico que resulta da cozedura a temperaturas elevadas (na ordem dos 1450°C) de uma mistura moída e proporcionada de calcário, margas, argila, contendo eventualmente substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro, constituindo assim o designado cru.

O cru passa por um controlo de finura e de composição química e é novamente sujeito a temperaturas elevadas em fornos rotativos. Submetido novamente a altas temperaturas, 20% do material funde-se e o restante reage entre si. O resultado destes processos químicos e físicos, e do arrefecimento rápido, leva à formação de pedaços de dimensões variáveis (entre 2 e 20 mm) designados por clínquer. Os constituintes do clínquer são essencialmente constituídos por: silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico e aluminoferrato tetracálcico. Por fim, o clínquer é arrefecido e moído, adicionado de gesso (regulador de presa) e adições minerais (filler calcário, escórias de alto forno ou cinzas volantes), originando o cimento Portland [Faria, 2004, Sousa-Coutinho, 1988].

Na norma NP EN 197-1 (2012) encontra-se registada toda a informação relativamente à composição, especificações e critérios de conformidade, necessários para a caracterização dos cimentos. O cimento quando misturado com o agregado e água, permite a produção de uma argamassa, que atinge níveis de resistência específicos e possui estabilidade a longo prazo. Os cimentos são classificados relativamente ao seu tipo, e à sua classe de resistência à compressão mínimas aos 28 dias em MPa [Martins, 2008].

2.1.2 Materiais pozolânicos

As pozolanas são objeto de normalização em Portugal [NP 4220: 2010], estabelecendo as condições necessárias de aptidão para utilização destas como adição do tipo II, no fabrico de betão estrutural, de argamassas e de caldas.

De acordo com esta mesma norma, as pozolanas são definidas como “materiais que, apesar de não terem por si só propriedades aglomerantes hidráulicas, são capazes de se combinar com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e, em presença de água, formar compostos semelhantes aos originados na hidratação de constituintes do cimento Portland” [NP 4220: 2010]. São constituídas essencialmente óxidos de silício (SiO_2), alumínio (Al_2O_3), cálcio (CaO), ferro (Fe_2O_3) e outros óxidos em menores teores.

As pozolanas podem ser divididas em dois grandes grupos, naturais e artificiais, conforme a sua origem. Estes grupos vão ser apresentados nos próximos subcapítulos, tais como os principais materiais, e aqueles que mais potencialidades têm de produção e utilização no nosso país.

Em termos de utilização, as pozolanas naturais são preteridas às artificiais, devido aos custos inerentes necessários para as extrair e transportar, e também pela abundância de subprodutos industriais pozolânicos existente [Gray *et al.*, 2003].

Segundo Massazza [1993] as pozolanas podem dividir-se de acordo com a Figura 2.1.

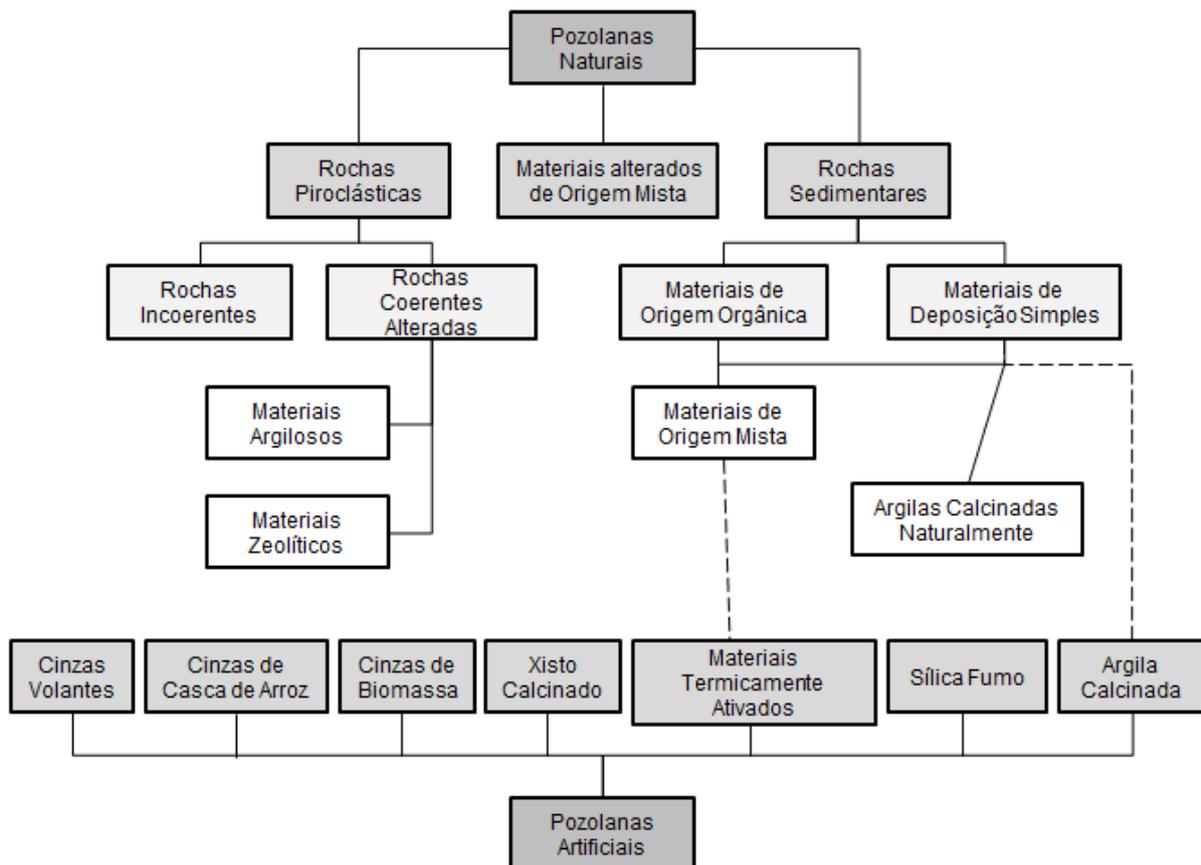


Figura 2.1 - Organização das pozolanas (adaptado de Massazza [1993])

2.1.2.1 Pozolanas Naturais

São materiais caracterizados pelo elevado teor em sílica amorfa, sendo possível fazer a sua divisão relativa à sua origem: vulcânica, sedimentar ou mista [Massazza, 1976].

- Rochas Vulcânicas incoerentes

Este tipo de rochas apresenta-se consolidado à superfície a partir da matéria expelida pelos vulcões. São encontradas geralmente como fluxos de lava ácida ou neutra solidificada, que inclui riólitos e andesitos, ou através de cinzas vulcânicas soltas ou consolidadas em tufos.

Em Portugal, como rochas incoerentes, temos os tufos e pedra-pomes provenientes dos Açores e da Madeira. São também conhecidas as pozolanas de Cabo-Verde constituídas por tufos vulcânicos que resultaram da aglomeração de cinzas vulcânicas, alteradas pela ação das águas carbonatadas. Estas pozolanas são altamente porosas, pouco densas, ricas em material vítreo e de cor clara [Sousa-Coutinho, 1958].

- Zeólitos Naturais (Rochas coerentes alteradas)

Os zeólitos naturais definem-se como minerais alumino-silicatados hidratados e apresentam uma estrutura porosa em “gaiola”. Os zeólitos naturais apresentam, em geral, impurezas indesejáveis e valores elevados de superfície específica, tanto interna como externa. A grande superfície específica destes materiais é a base para os valores elevados de reatividade pozolânica. Em termos de composição química apresentam uma grande variabilidade, a qual varia significativamente mesmo dentro do mesmo depósito [Braga *et al.*, 2007].

Os zeólitos naturais são menos consumidos que os zeólitos artificiais; no entanto, em países como a China e Cuba, ricos em zeólitos naturais, o seu consumo é elevado. Uma das principais utilizações dos zeólitos naturais naqueles países é na produção de cimento pozolânico [Faustino, 2010].

- Materiais alterados de origem argilosa e mista

Estas pozolanas naturais são obtidas da mistura de materiais com origens diversas, tanto rochas piroclásticas como sedimentares, tendo sempre como base a sua origem argilosa. Estes materiais, devido à sua forte componente argilosa, podem ser utilizados na sua forma natural ou após ativação térmica.

- Materiais de origem sedimentar orgânica

Neste grupo incluem-se as diatomites ou terras diatomáceas, que são um conjunto de minerais resultantes da fossilização das conchas siliciosas de organismos unicelulares, que são geralmente designados por diatomas. Estes organismos apresentam paredes celulares siliciosas não cristalinas, designadas por frústulos, que após ação da temperatura entre os 500°C e 900°C passam a conter propriedades pozolânicas muito reativas. A diatomite é uma rocha de aspeto pulverento, leve, composta de algas microscópicas, que variam a sua dimensão entre 10 a 500 micrómetros, com estrutura de sílica amorfa hidratada. Incluem também quantidades reduzidas de substâncias inorgânicas como alumina, ferro, metais alcalinos e quantidades variáveis de matéria orgânica.

Dependendo do grau de pureza do material dado pelo teor de frústulos, pode ser misturado diretamente nas argamassas para substituição do ligante, ou então adicionado após o tratamento térmico. Estes materiais apresentam elevada reatividade pozolânica, mas devido à sua angulosidade e alta porosidade obrigam a grande incorporação de água, prejudicando a resistência e a durabilidade das argamassas e betões [Veiga, 2003; Tavares, 2008a].

Em Portugal as maiores jazidas de diatomite são na região de Óbidos.

- Materiais de deposição simples

Este grupo de materiais é constituído por argilas que são calcinadas naturalmente, e incluem principalmente argilas betuminosas, gás de xisto ou shale. Estes materiais têm a característica de, ao entrarem em contato com o ar, auto inflamarem, atingindo temperaturas elevadas que vão ativar os materiais argilosos, pouco reativos naturalmente. Entretanto, para desenvolver níveis de atividade pozolânica aceitável, estes materiais, que apresentam quantidades substanciais de argila e xisto, precisam de ser termicamente ativados.

Em Portugal os centros de produção de argila estendem-se um pouco por todo o país, sendo mais concentrados nos distritos de Aveiro, Coimbra e Leiria [Pontes, 2011; Mehta, 1987].

2.1.2.2 Pozolanas Artificiais

As pozolanas artificiais dividem-se em subprodutos e resíduos industriais, que quando aquecidos a temperaturas entre os 500°C e os 900°C, passam a ter propriedades pozolânicas [Faria, 2004].

- Cinzas de Biomassa

As cinzas de biomassa são o resultado da queima de matéria orgânica, como resíduos de substâncias vegetais e animais, da floresta e das indústrias conexas, bem como a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos. A maioria das cinzas de biomassa produzidas é depositada em aterro, ato que pode ser considerado um desperdício de nutrientes e subaproveitamento do material que é rico em sílica amorfa [Pels et al., 2005]. A utilização destes materiais como pozolana, nas devidas condições e proporções, leva à melhoria do desempenho das argamassas e betões, tal como a eliminação de um resíduo do meio-ambiente [Almeida et al., 2010].

As cinzas de biomassa são geralmente formadas na sua maioria por elementos inorgânicos presentes nos combustíveis da biomassa, como o cálcio (Ca), potássio (K), sódio (Na), silício (Si) e fósforo (P), que assumem um papel importante de nutriente para a biomassa [Masiá et al., 2007]

A qualidade e quantidade das cinzas produzidas são fortemente influenciáveis pelas características da biomassa utilizada. As cinzas provenientes da combustão da biomassa têm características bastante diversificadas e dependem de vários fatores, como o tipo de biomassa, método de colheita e condições de combustão [Loo, 2008; Singh et al., 2011]. O mesmo tipo de biomassa pode apresentar diferenças nas suas características devido a fatores de crescimento, produção, clima, armazenamento e origem geográfica [Ahmaruzzaman, 2010].

Rejini Rajamma (2011) recomenda também a utilização de cinzas de biomassa em percentagens inferiores a 20% de substituição do cimento para a produção de materiais de qualidade à base de cimento. Nas argamassas constituídas por 10% e 20% de cinzas de biomassa num estudo efetuado a um ano, observou-se que as argamassas de cinza apresentam resistências mecânicas de 90-95% em relação as argamassas de referência.

Segundo Cheah Chee Ban (2011), as cinzas podem ser eficazmente utilizadas como um material de substituição parcial do cimento para a produção de betão com resistência e durabilidade aceitável, com melhor consistência ao longo do tempo de cura e menor taxa de produção de calor relativamente às argamassas de cimento. Concluiu também que as argamassas com cinzas necessitam de uma quantidade de água superior para atingir a mesma trabalhabilidade das argamassas só de cimento, o que origina uma redução da massa específica do betão e das argamassas no estado endurecido. De salientar que apesar das cinzas quando utilizadas como material de substituição parcial do cimento reduzirem as suas resistências mecânicas (flexão e compressão), neste estudo Cheah Chee Ban (2011) observou que a inclusão de cinzas em baixos teores de substituição (10-20%) provocou um aumento da sua resistência à compressão.

- Metacaulino

O metacaulino é uma pozolana artificial obtida através da calcinação do caulino, por cozedura do material caulinitico a temperaturas adequadas, podendo apresentar diferentes tipos de pureza [Velosa, 2006; Pera, 2001]. Após a calcinação, realiza-se a moagem do material para reduzir a dimensão dos grânulos, aumentando a sua superfície específica e, conseqüentemente, a reatividade pozolânica [Kaloumenou *et al.*, 1999].

Na literatura existente sobre o metacaulino encontram-se diferenças no intervalo de temperatura a que ocorre o processo de calcinação, divergindo conforme os diferentes autores:

Sabir *et al.* (2001) -> 650°C – 800°C

Souza *et al.* (2005) e Siddique *et al.* (2009) -> 500-900°C

Paiva *et al.* (2012) -> 700°C-850°C

Durante a calcinação do caulino, existe uma fase de aquecimento a temperaturas de cerca dos 100°C, ocorrendo a perda de água absorvida à superfície, seguida de uma fase de desidroxilação (perda de hidroxilos) que ocorre no intervalo entre os 400°C e os 650°C, com posterior formação do metacaulino [Velosa, 2006; Said-Mansour *et al.*, 2011]. Esta transformação do caulino em metacaulino, tem como resultado um material com propriedades pozolânicas e elevada reatividade. Caso o metacaulino seja aquecido a temperaturas acima dos 900°C originará a mulite, que é um material não pozolânico [Sousa-Coutinho, 1997].

Wild *et al.* e Lagier *et al.* (1996; 2007) consideram o metacaulino um material diferente das outras pozolanas, não apenas pela sua alta reatividade, mas também pela sua capacidade catalisadora durante a reação de hidratação do cimento. Vários autores demonstram que o uso de metacaulino contribui para a melhoria da durabilidade do betão, na inibição das reações alcális-silica e na resistência a ataques químicos. Outras características também foram notadas em argamassas com adição de metacaulino tais como: aumento da resistência à compressão e à flexão, redução da permeabilidade à água e aumento da compacidade do betão [Siddique, *et al.*, 2008; Caldarone *et al.*, 1994; Wild *et al.*, 1996].

Bandeira (2012) estudou a adição de metacaulino em diferentes teores (30% e 50%) aos 180 dias. O seu estudo demonstrou que a substituição de 50% de cal aérea por metacaulino se torna benéfica em termos de resistências à tração e compressão aos 180 dias em argamassas com traço 1:3; as argamassas de traço 1:2 revelaram o aumento da resistência mecânica com o aumento do teor de metacaulino; nas argamassas de traço 1:1 a composição com 30% de metacaulino apresentou ser a mais resistente e menos deformável.

- Pó de vidro

O vidro é um material isotrópico, homogéneo, estável, inerte e amorfo, obtido através da calcinação a altas temperaturas de materiais constituídos essencialmente por sílica (SiO₂) e, em menores percentagens, de carbonato cálcio (CaCO₃) e carbonato de sódio (Na₂CO₃) [Ortiz, 1996].

O vidro moído tem sido utilizado como agregado no betão e como matéria-prima na produção de cimento Portland; no entanto os melhores resultados foram encontrados com a utilização do vidro como material de substituição do cimento [Meyer *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2002].

Devido às elevadas quantidades de sílica e à sua estrutura amorfa, o vidro torna-se suscetível aos ataques químicos, originando o gel de reação alcális-sílica (RAS), que é expansivo [Shayan, 2004]. De acordo com Corinaldesi *et al.* (2005) e Shayan (2004) a RAS pode ser evitada se o vidro for moído em dimensões inferiores a 75µm, contribuindo assim para o aumento da durabilidade das argamassas. Segundo Shi (2005) quanto mais fina for a partícula do pó de vidro, maior será a sua reatividade pozolânica.

Fragata (2008) estudou a incorporação de resíduos de vidro em argamassas de cal aérea, para substituição de rebocos em edifícios antigos, tendo obtido valores de resistências (flexão e compressão) e coeficientes de absorção capilar, em condições de cura seca, semelhante ao das argamassas de referência.

Em Portugal, a maioria do vidro não reciclável vem da indústria do engarrafamento e constitui um problema ambiental devido à falta de soluções para o seu aproveitamento, sendo prática comum o seu depósito em aterro. O reaproveitamento das garrafas dispostas em depósito é feito principalmente como utilização em matéria-prima para novos produtos. Estima-se que apenas 30% das garrafas utilizadas estão atualmente a ser recicladas [Oliveira, 2012].

- Cinzas volantes de carvão

As cinzas volantes são um subproduto da indústria de produção energética, em forma de pó mineral fino e leve. O carvão é queimado a temperaturas na ordem dos 530°C e recuperado em forma de cinzas, através de precipitadores mecânicos ou eletrostáticos, sendo geralmente separadas e armazenadas por granulometrias [Coelho, 2007]. Durante este processo, a utilização de diferentes tipos de carvão e caldeiras, origina cinzas volantes diferentes (cinzas volantes siliciosas, sílico-cálcicas ou cálcicas) com propriedades pozolânicas. A NP EN 450-1 (2012) atribui as especificações e critérios de conformidade, tais como os procedimentos experimentais necessários para o controlo de qualidade para as cinzas volantes siliciosas, e para a sua utilização na produção de betão, ou em argamassas e caldas.

Em Portugal a produção de cinzas volantes é efetuada na sua maioria nas centrais de Sines e do Pego. As cinzas são aproveitadas e valorizadas pela indústria cimenteira, sendo utilizadas no fabrico de cimentos e betões.

- Argila expandida

A argila expandida é um material cerâmico que resulta da calcinação de argila pura, selecionada, em fornos rotativos e a temperaturas elevadas, onde se dá libertação de gases que provocam uma expansão controlada. Deste processo resulta a formação de grânulos que, no seu interior, contém milhares de microporos fechados com ar, que conferem ao material leveza e características elevadas de isolamento térmico. Estas propriedades, conjugadas com a sua natureza

mineral, tornam a argila expandida um agregado leve com características de isolante térmico durável e com boa resistência mecânica.

A calcinação da argila a temperaturas elevadas (superiores a 1000°C) leva à transformação de alguns dos seus compostos que, após o arrefecimento, originam compostos cristalinos, diminuindo a sua potencialidade como material pozolânico.

A argila expandida é utilizada essencialmente como agregado na produção de betões leves e como agente filtrante de água, devido à sua elevada área de superfície [Silva, 2007].

Tavares (2008) estudou a utilização de argamassas de reparação com cal aérea e argila expandida para uma fortaleza marítima, tendo obtido características mecânicas similares às da argamassa de referência.

Velosa (2006) utilizou o resíduo da argila expandida na composição em volume 1:1:4 (cal: pozolana: areia) obtendo resultados de resistência mecânica superior às da argamassa só de cal aérea. Estas argamassas apresentaram-se também permeáveis ao vapor de água e com secagem rápida.

- Cinza casca de arroz

As cinzas de casca de arroz são provenientes da queima de um subproduto da agricultura, com grande conteúdo em sílica, que foi absorvida pelas plantas durante o seu crescimento. Após a queima das cascas, sobram 20% em volume de cinza, com um teor de sílica superior a 85%, que pode ser utilizada em argamassas e betões, para melhoria das propriedades destes materiais. As cinzas de casca de arroz possuem elevada superfície específica, o que lhes confere elevada reatividade. As características da cinza de casca de arroz, tal como as das cinzas volantes, variam muito consoante o processo e a temperatura de queima. A cinza originada de queima controlada entre os 400°C e 600°C gera sílica amorfa abundante e, portanto, altamente reativa; já a cinza queimada por longo tempo em temperaturas muito altas, entre 800 e 1000°C, apresenta compostos cristalinos, como cristobalite e quartzo, sem reatividade com o hidróxido de cálcio [Pouey, 2006].

Almeida *et al.* (2007), que usou cinzas de casca de arroz como pozolana em argamassas de cal aérea, constatou que a sua adição contribuiu para o aumento da resistência das argamassas aos sulfatos e cloretos.

Cordeiro *et al.* (2009) tirou a mesma conclusão para argamassas de cimento, e ainda notou o aumento de resistência mecânica nas misturas com 20% de cinzas de casca de arroz relativamente às argamassas de referência. De destacar que a substituição de cimento por cinza de casca de arroz levou à diminuição da trabalhabilidade.

2.1.3 Agregados / Areias

Os agregados mais utilizados na produção de argamassas são as areias. As areias são materiais granulares finos, que aglomerados por um ou mais ligantes ganham coesão e funcionam como o esqueleto da argamassa [Bauer, et al.,2005]. Existem vários tipos de areia e as mais

frequentemente utilizadas em Portugal são as areias: de rio, de areiro e as resultantes da fragmentação das rochas [Faria, 2004].

Os agregados, apesar de não interferirem na reação de endurecimento, assumem um papel importante na redução da retração, durante o período de secagem, contribuindo para a estabilidade e durabilidade da argamassa [Margalha, et al., 2007, Stefanidou, et al., 2005].

Os agregados podem ser classificados segundo a sua origem (naturais, artificiais e reciclados), dimensões das partículas (fino ou grosso) e massa volúmica [NP EN 13139, 2005]. Sendo que os agregados utilizados nas argamassas são os agregados finos. A qualidade do agregado e a dimensão das partículas são fatores que influenciam de forma significativa as características e comportamento das argamassas. A granulometria dos agregados deve ser a mais distribuída possível, com menor índice de vazios, de modo a produzir argamassas com menor quantidade de ligante, e menor quantidade de água, reduzindo problemas relativos à retração e fissuração [Melo *et al.*, 2010]. Granulometrias equilibradas e contínuas conseguidas através da mistura de areias mais grossas e mais finas, resultam na diminuição do volume de vazios, aumentando a compacidade, trabalhabilidade e resistências à flexão e à compressão das argamassas [Margalha, et al., 2007].

Os agregados devem apresentar-se limpos e secos, de modo a evitar a presença de matérias orgânicas e sais minerais solúveis, que podem provocar alterações do processo de presa ou provocar eflorescências [Botelho, 2003].

2.2 Argamassas Pozolânicas

Em seguida serão analisadas as argamassas pozolânicas com diferentes ligantes minerais (cal aérea e cimento Portland), referindo-se em particular as suas principais características e vantagens/desvantagens. No entanto, é importante considerar que as características de determinada mistura dependem de uma série de parâmetros, tais como: finura e forma das partículas, área superficial específica, razão água/cimento, composição, tipo e teor de pozolana, os quais são fatores determinantes na reatividade pozolânica [Mehta, 1999; Massazza, 2007].

-Argamassas de cal aérea e pozolanas

As argamassas de cal aérea com adição de materiais pozolânicos têm tido nos últimos anos um redobrado interesse por parte da comunidade técnica e científica, nomeadamente pelo seu grande potencial na conservação de edifícios antigos. Tal interesse nas argamassas de cal aditivadas com pozolanas advém de que na maior parte dos edifícios antigos a cal aérea terá sido o ligante utilizado, situação que as coloca à partida, por exemplo comparativamente às argamassas de cimento Portland, como a solução mais compatível e durável para intervenções de conservação. Já as argamassas só de cimento Portland apresentam inconvenientes conhecidos, como o elevado módulo de elasticidade, prejudicial na aderência ao suporte, baixa permeabilidade ao vapor de água, que permite a introdução de sais solúveis, e incompatibilidade química com o suporte [Coelho *et al.*, 2009].

O maior problema da utilização da cal aérea deve-se ao processo extremamente lento de carbonatação. A incorporação de pozolanas nessas argamassas surge com o objetivo de diminuir o tempo de endurecimento e incrementar as resistências mecânicas, nomeadamente por conferirem características hidráulicas a essas argamassas [Faria et al., 2011; Massazza, 2007].

Um estudo realizado por Walker (2011) em argamassas de cal aérea e pozolanas, relativamente às suas propriedades físicas e reatividade, concluiu que a superfície específica da pozolana comanda a quantidade de água necessária na mistura, enquanto o teor de material amorfo determina a resistência mecânica da argamassa.

-Argamassas de cimento e pozolanas

A adição de pozolanas em materiais de base cimentícia, como argamassas e betões, tem também aumentado de interesse nos últimos anos, em particular, nos aspetos relacionados com a melhoria da durabilidade desses materiais.

A mistura de pozolanas com o cimento Portland contribui para a redução do teor de hidróxido de cálcio livre, composto que resulta da hidratação do cimento, o qual é apresentado como um dos fatores condicionantes na durabilidade desse ligante. A redução do hidróxido de cálcio por via do seu consumo na reação com as pozolanas (reação pozolânica) tem uma grande influência, por exemplo, na resistência ao ataque dos sulfatos e nas reações álcalis-sílica. Pode proporcionar também valores de resistências mecânicas superiores às das argamassas sem pozolanas, devido à formação de compostos cimentícios gerados pela reação do hidróxido de cálcio com a sílica e alumina ativas, encontradas nas pozolanas [Sabir *et al.*, 2001].

Comparativamente ao cimento Portland, os cimentos pozolânicos apresentam as seguintes diferenças:

- Resistências iniciais mais fracas e superiores a longo-prazo
- Fluência superior
- Menor calor de hidratação
- Maior porosidade
- Menor permeabilidade
- Maior resistência ao ataque dos cloretos e sulfatos
- Inibição da expansão álcalis-sílica

No entanto, algumas propriedades como a retração e a resistência ao gelo/degelo, apresentam um comportamento semelhante ao das argamassas sem pozolanas.

Estas propriedades estão associadas às diferenças químicas e mineralógicas da composição do cimento, mecanismos de hidratação, composição e microestrutura da mistura [Massazza, 1993].

Em suma, o cimento Portland é preferido quando é extremamente necessário alcançar resistências elevadas num curto espaço de tempo. Já os cimentos pozolânicos serão mais adequados para aplicações em que se privilegiam os requisitos de durabilidade [Mehta, 1987; Massazza, 1993].

2.3 Reatividade Pozolânica

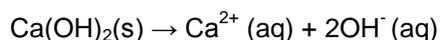
Define-se reação pozolânica como a reação química que ocorre pela combinação entre a sílica e a alumina amorfa de um dado material pozolânico, com o hidróxido de cálcio, na presença de água. Esta reação origina a formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, respetivamente (silicatos de cálcio hidratado CSH, silicoaluminatos de cálcio hidratados CASH e aluminatos de cálcio hidratado CAH), do tipo dos que se desenvolvem na hidratação do cimento Portland, [Callejas, 1958; Faria, 2004]. Por sua vez, a reatividade pozolânica é o grau de pozolanicidade de um dado material, o qual é obtido através da classificação desta reação [Velosa, 2006].

O hidróxido de cálcio, ou portlandite (Ca(OH)_2), é o reagente comum da reação pozolânica, presente tanto na cal aérea, como no cimento Portland. No cimento Portland este composto é libertado durante o processo de hidratação, enquanto na cal aérea ele está presente na sua constituição [Sousa-Coutinho, 1958].

Na hidratação do cimento Portland o hidróxido de cálcio é o composto em geral associado à fraca durabilidade desse ligante. No entanto, a sua eliminação ou redução através da reação pozolânica contribui significativamente para o aumento da durabilidade e resistência do cimento [Sabir *et al.*, 2001].

Segundo Massazza (1993) a reatividade pozolânica baseia-se em dois parâmetros essenciais: quantidade máxima de hidróxido de cálcio que uma pozolana consome e a velocidade com que essa reação ocorre. Ambos os parâmetros estão diretamente relacionados com as características físicas e químicas da pozolana e, mais precisamente, com a quantidade e qualidade das fases ativas. Daí que quanto maior for a estrutura amorfa da pozolana, maior será a combinação e velocidade de reação com o hidróxido de cálcio.

Cajun Shi *et al.* (2000) consideram que a reação pozolânica é desencadeada pela hidrólise do hidróxido de cálcio, de acordo com a seguinte reação:



As pozolanas, sendo constituídas fundamentalmente por matéria vítrea siliciosa ou aluminosa, são atacadas pelo anião OH^{-} que dissocia os principais constituintes da pozolana (SiO_2 – sílica e Al_2O_3 – alumina), tornando-os eletricamente instáveis. Por sua vez, os óxidos vão reagir com o ião Ca^{2+} e com os grupos hidroxilo (OH^{-}), formando os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, que possuem compostos com propriedades aglomerantes e resistentes [Faria, 2004; Silva, 2005].

De acordo com Massazza (1993) a reatividade de uma pozolana depende dos seguintes fatores:

- Composição química e mineralógica
- Tipo e teor das fases ativas na pozolana – as estruturas amorfas são mais reativas do que as cristalinas, tendo em conta a maior mobilidade e localização superficial dos seus átomos.
- Área da superfície específica da partícula – valores de área específica mais altos e/ou dimensões das partículas inferiores, proporcionam o aumento da exposição da superfície da partícula para a reação química, aumentando assim a reatividade.
- Razão pozolana/cal – através dos seus estudos Massazza verificou que quando diminui a razão cal/pozolana o teor de hidróxido de cálcio consumido aumenta. Verificou também que as pozolanas mais reativas consomem maior percentagem de hidróxido de cálcio, comparativamente com as menos reativas.
- Teor em água.
- Condições de cura – de acordo com os estudos efetuados por Lea (1970), Sousa-Coutinho (1988) e Faria (2004), as curas realizadas com maiores teores de humidade e temperatura favorecem a reatividade pozolânica.
- A presença de sulfatos, como gesso e sulfato de sódio (Na_2SO_4) e outros compostos químicos, como o cloreto de cálcio (CaCl_2).

2.4 Métodos de ensaio para avaliação da reatividade pozolânica

A reatividade pozolânica pode ser determinada através da medição de propriedades mecânicas, físicas e químicas. Os métodos utilizados podem ser classificados como diretos ou indiretos.

Os métodos diretos monitorizam a presença de hidróxido de cálcio e a sua variação com o tempo ao longo da reação pozolânica, usando métodos analíticos como a difração de raios X, análise termogravimétrica ou métodos químicos [Donatello,2010].

Os métodos indiretos medem as variações ocorridas numa propriedade física, por exemplo, a resistência à compressão, condutividade elétrica ou libertação de calor por calorimetria. Os resultados dos métodos indiretos são geralmente validados pelos métodos diretos, confirmando a ocorrência de reatividade pozolânica [Donatello, 2010].

2.4.1 Ensaio de Chapelle modificado

Este ensaio foi desenvolvido primeiramente por J. Chapelle (1958) com o objetivo de avaliar a reatividade pozolânica de um material, tendo como base o consumo de portlandite num meio saturado de água. Mais tarde o ensaio sofreu algumas alterações protagonizadas por Benoit e Largent, relativamente ao nível da temperatura, à duração do ensaio e introduziu-se a agitação constante, tendo este passado a chamar-se “ensaio de Chapelle modificado” (Figura 2.2).

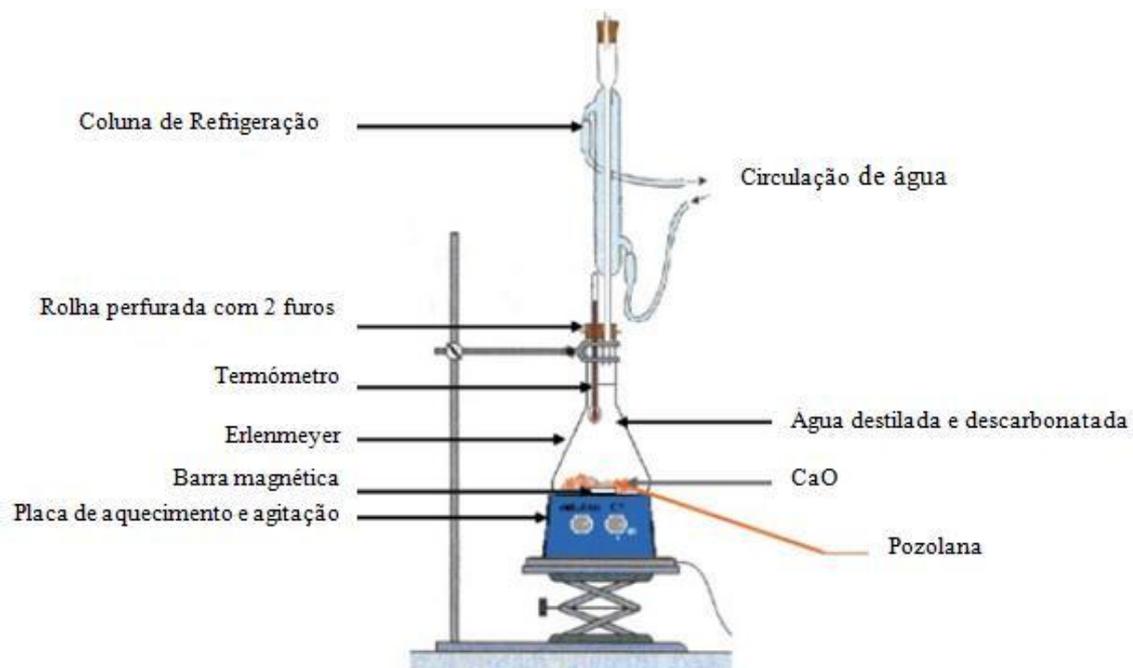


Figura 2.2 - Montagem do ensaio de Chapelle adaptado de NF P 18-513 (2009).

O ensaio de Chapelle, de acordo com a norma francesa NF P 18-513 (2009), permite avaliar a reatividade pozolânica através da medição da quantidade de Ca(OH)_2 consumida por grama de material ensaiado. O ensaio consiste em juntar 1 grama de pozolana com 2 gramas de óxido de cálcio e adicionar a 100ml de água destilada, aquecer e deixar à temperatura $85 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 16 horas numa placa com agitação. Através duma titulação ácido-base é possível determinar a quantidade de cal consumida pela pozolana [NF P 18-513, 2010].

Na norma NF 18-513 é estipulado o valor que o metacaulino deverá apresentar para ser considerado de pozolana, qual deverá ser superior a $700 \text{ mg Ca(OH)}_2 / \text{g metacaulino}$.

Segundo Ferraz (2012), no estudo realizado com oito metacaulinos comerciais e a uma argila caulinítica, o ensaio de Chapelle modificado é uma metodologia simples, rápida e eficiente de determinar a reatividade pozolânica de metacaulinos.

Kasemsuknimit (2010) e Pontes (2011) realizaram estudos de comparação de diferentes métodos de determinação de reatividade pozolânica, e concluíram que o ensaio de Chapelle mostra uma boa correlação com teste de índice de atividade, considerando que os seus resultados são um bom indicativo do comportamento da pozolana nos primeiros 28 dias de idade.

2.4.2 Ensaio de Frattini

Este método direto encontra-se normalizado (NP EN 196-5) [CEN, 2011] e foi concebido para determinar a pozolanicidade de cimentos pozolânicos, embora também se utilize para caracterizar misturas de cimento e pozolana.

É um método químico utilizado para determinar a concentração do íão cálcio (expresso em óxido de cálcio) e do íão hidroxilo, presentes na solução de cimento com pozolana a ensaiar, através de titulações ácido-base.

O ensaio consiste em misturar 20g do cimento pozolânico em estudo, com 100ml de água destilada e manter numa estufa a cerca de 40°C. Após 8 dias, ou 15 dias no caso do resultado dos 8 dias ser negativo, parte da amostra é filtrada e mantida em repouso até a temperatura estabilizar. Posteriormente, determina-se a concentração do íão OH⁻ titulando a amostra com uma solução diluída (0,1 M) de ácido clorídrico (HCl) e indicador alaranjado de metilo; para a determinação do íão Ca²⁺ faz-se o ajuste de pH a 12,5, seguindo-se a titulação com a solução de EDTA usando o indicador de calcon ou Patton Reeders. Os resultados são apresentados num gráfico, colocando no eixo das abcissas os valores de [OH⁻] em mmol/l e no eixo das ordenadas, os valores de [CaO] também em mmol/l.

Neste gráfico é representada a curva de solubilidade do íão cálcio a 40°C na presença de portlandite [Calleja, 1958]. Os resultados apresentados acima ou coincidentes com essa linha, correspondem a reduzida atividade pozolânica, e no caso contrário significam que a mistura é pozolânica. A concentração máxima teórica de CaO pode ser calculada utilizando a fórmula apresentada na EN 196-5 [CEN, 2011] para traçar a curva de solubilidade da cal [Donatello, 2010].

$$[\text{CaO}] = \frac{350}{[\text{OH}^-] - 15} \quad (\text{mmol/l})$$

O ensaio de Frattini só admite valores no eixo das abcissas ([OH⁻]) entre os 35 e 100 milimoles, enquanto nas ordenadas ([CaO]) o limite é de 18 milimoles, como apresentado na Figura 2.3.

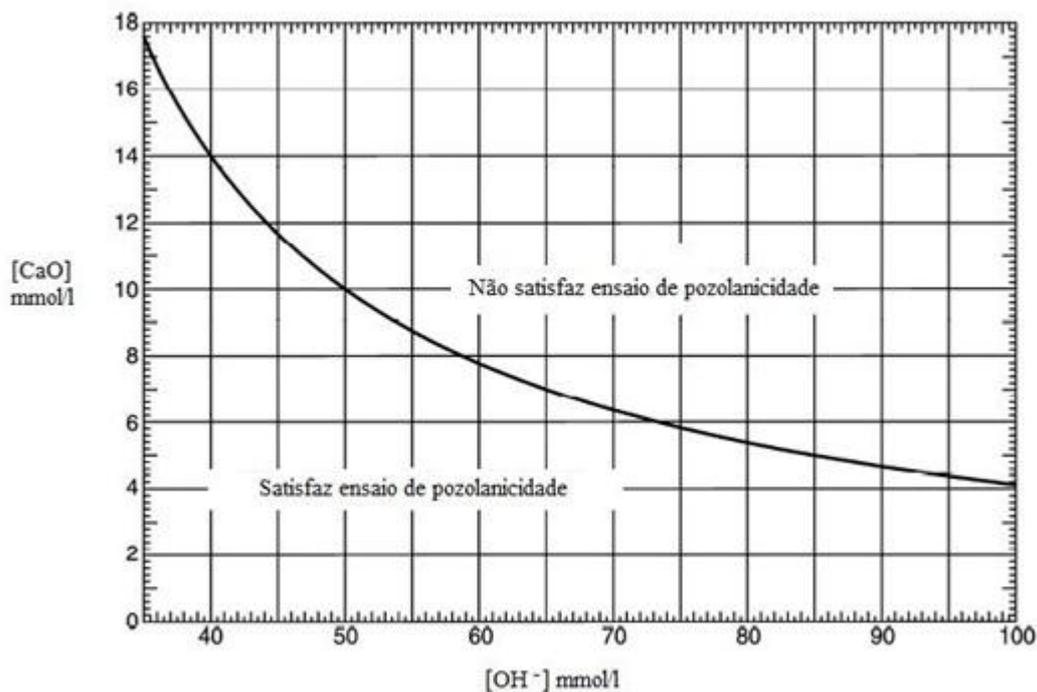


Figura 2.3 - Diagrama para a determinação da pozolanicidade segundo a NP EN 196-5.

Segundo Pontes (2011) a grande limitação deste ensaio deve-se à avaliação de misturas altamente reativas, em que os resultados podem sair fora dos parâmetros de leitura permitidos pela norma.

2.4.3 Índice de atividade

O ensaio de índice de atividade permite relacionar a resistência à compressão de uma argamassa de controlo, com uma argamassa em que se substitui uma parte de ligante por determinado teor de pozolana.

Na norma NP EN 450-1 [IPQ, 2012] correspondente à definição, especificações e critérios de conformidade para a utilização de cinzas volantes em betões, encontra-se a descrição do ensaio de índice de atividade, tal como a percentagem de substituição do ligante hidráulico (CEM I 42,5R), valores de referência e espalhamento requerido. O método de ensaio mecânico referido na norma é o NP EN 196-1 [CEN, 2005] por se tratar de cimentos; no entanto, apesar de não existir nenhuma referência ou ligação à norma EN 1015-11 [CEN, 1999], esta pode ser utilizada para argamassas em que o ligante é de cal aérea. Segundo a norma, para a pozolana apresentar um valor de conformidade, deverá apresentar valores de resistência à compressão, aos 28 e 90 dias, superiores a 75% e 85% da argamassa de controlo.

O índice de atividade é frequentemente utilizado na caracterização das propriedades mecânicas de misturas de cimento com pozolanas, embora tenha sido projetado para cinzas volantes.

Este ensaio desenrola-se em termos de medição de resistência mecânica, em vez de reatividade pozolânica, permitindo uma boa correlação com o ensaio de Frattini [Pontes, 2011].

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 Materiais

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de ligantes minerais, três pozolanas e uma mistura de areias siliciosas como agregado, que serão descritos e caracterizados nos próximos subcapítulos e apresentados no quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Materiais utilizados e sua designação.

Ligantes	Cal aérea – CL
	Cimento Portland – CP
Pozolanas	Cinzas de Biomassa – CB
	Metacaulino – MK
	Pó de Vidro – PV
Agregados	Areias APAS 12, APAS 20 e APAS 30

Os materiais foram devidamente guardados e fechados nos seus sacos, de forma a evitar a sua contaminação e contato com humidade.

3.1.1 Agregados

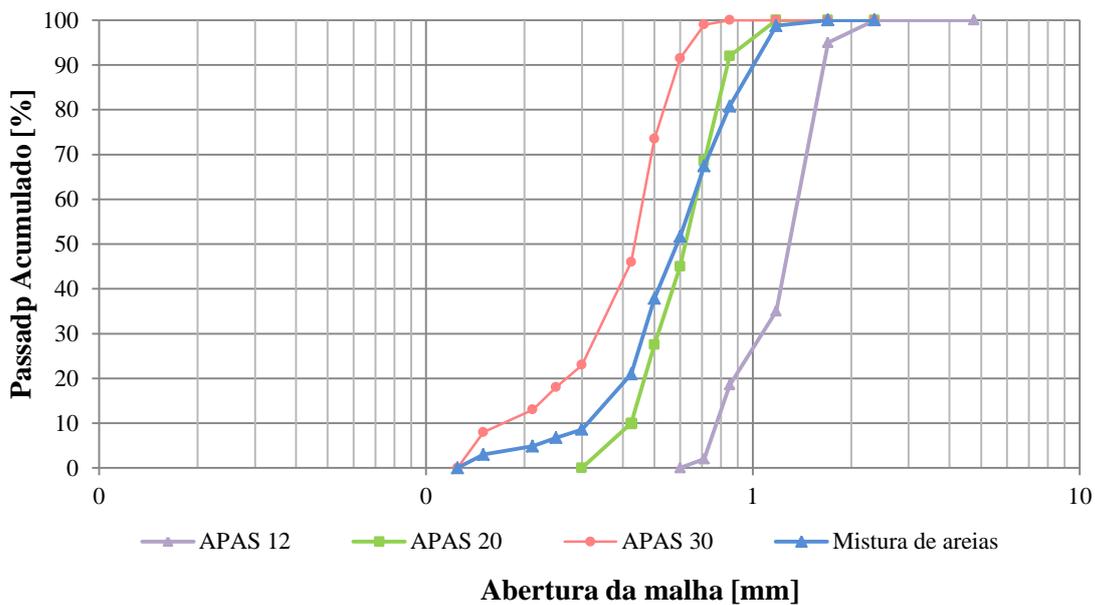
Para a elaboração de argamassas foi utilizada uma mistura de areias siliciosas lavadas e graduadas, mas de diferente granulometria (figura 3.1). Essas areias, com as referências APAS 12 (mais grossa), APAS 20 (intermédia) e APAS 30 (mais fina) foram utilizadas numa mistura com traço volumétrico 1:1,5:1,5 em todas as argamassas realizadas.

A proporção desta mistura foi previamente definida no âmbito dos projetos financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia METACAL e LIMECONTECH, através das curvas granulométricas e valores de baridade, determinados respetivamente pelas normas NP EN 933-1 [IPQ, 2012] e NP EN 1097-3 [IPQ, 2002b].



Figura 3.1 - Areias utilizadas.

A análise granulométrica consiste em fazer passar os agregados por um conjunto de peneiros com diferente abertura de malha, permitindo, após agitação mecânica, a separação de partículas por dimensões. A curva granulométrica foi traçada pela percentagem de massa de material passado acumulado de cada um dos peneiros. Assim obtiveram-se as curvas granulométricas apresentadas na Figura 3.2.



3.1.2 Ligantes

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de ligantes diferentes, tendo sido produzidas argamassas com cal aérea e cimento Portland para serem ensaiadas mecanicamente à flexão e à compressão. O cimento Portland foi também utilizado na realização do ensaio de Fratini fazendo parte da mistura de ligantes ensaiada.

Foi utilizada uma cal aérea hidratada em pó produzida pela Lusical, classificada como CL90, cuja composição química, obtida por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) é apresentada no Quadro 3.2. A Ficha Técnica do produto é apresentada no Anexo IV.

Quadro 3.2 - Composição química da cal aérea (% em massa) [Gameiro et al., 2012]

Designação	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.F.*
Cal aérea	-	0,01	0,15	0,01	3,09	76,74	-	0,02	0,04	0,01	20,45

*Perda ao fogo.

No Quadro 3.3 são apresentados os requisitos químicos estabelecidos pela norma NP EN 459-1 [IPQ, 2011] que devem ser cumpridos para a cal aérea ser classificada como CL90. Desprezando a perda ao fogo, confirma-se que a soma do teor dos óxidos CaO e MgO representa 99,7% e que o teor de MgO se traduz em 3,9% dos compostos identificados, cumprindo os requisitos químicos apresentados pela norma.

Quadro 3.3 - Requisitos químicos da cal cálcica (valores característicos) [IPQ,2011]

Tipo de cal cálcica	Valores em % em massa				
	CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Cal disponível
CL90	≥ 90	≤ 5	≤ 4	≤ 2	≥ 80

Em anexo é apresentado o difractograma resultante da análise de DRX, de onde se confirma que a cal é de natureza cálcica, uma vez que é constituída por portlandite (Ca(OH)₂) e calcite (CaCO₃).

Como ligante hidráulico utilizou-se um cimento Portland CEM I 42,5R proveniente do centro de produção da Cimpor em Alhandra. É um cimento certificado que cumpre a norma NP 197-1 [IPQ, 2012] respeitante à composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Segundo a ficha técnica que pode ser consultada no anexo III, apresenta as características químicas que constam no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Características químicas do cimento Portland CEM I 42,5R.

Designação	Valores em % em massa			
	Cl	SO ₃	P.F.*	R.I.**
Cimento Portland	0,1%	4,0%	5,0%	5,0%

*Perda ao fogo.

** Resíduo insolúvel.

3.1.3 Pozolanas

Neste trabalho foram utilizadas três pozolanas artificiais distintas, em termos de origem, de composição química e, de propriedades físicas, nomeadamente cinzas de biomassa, metacaulino e pó de vidro.

As cinzas de biomassa (CB) provêm da central de biomassa de Mortágua, dedicada à produção de energia elétrica através da combustão de resíduos florestais. Estes resíduos são constituídos na sua maioria por resíduos de eucaliptos, derivados da exploração florestal e do processamento de madeira. Esse combustível foi queimado numa caldeira onde as temperaturas atingem cerca de 1000°C.

O metacaulino (MK) utilizado é um produto comercial francês denominado de Argical M 1200S, produzido pela empresa Imerys. A ficha técnica apresentada no anexo V, revela o índice de pozolanicidade, segundo o ensaio de Chapelle, de 1400 mg Ca(OH)₂/g, e granulometria inferior a 2 µm para 55% das suas partículas. O difractograma por raios X é apresentado no anexo II.

O pó de vidro (PV) empregue resultou da moagem de vidro plano recozido utilizado em janelas e que foi disponibilizado pela empresa Vidrologic, responsável pela reciclagem de vários tipos de vidro. Apenas foi utilizado o pó de vidro com dimensões inferiores a 63 µm, obtido através de peneiração a jato de ar (Figura 3.3).



Figura 3.3 - Peneiração a jato de ar.

No Quadro 3.5 apresenta-se a composição química das pozolanas artificiais obtida por espectroscopia de fluorescências de raios X (FRX).

Quadro 3.5 - Composição química dos materiais pozolânicos.

Designação	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cl	SO ₃	P.F.*
CB	52,1	13,3	5,3	–	3,31	15,9	–	4,14	–	–	0,1	0,45	10,4
MK	54,39	39,36	1,75	0,01	0,14	0,10	–	1,03	1,55	0,06	–	–	1,90
PV	72,89	–	–	–	–	–	12,25	0,09	–	–	–	–	–

*Perda ao fogo.

O pó de vidro apresenta cerca de 85% de teores de álcalis (soma de sílica e sódio). Tratando-se de um vidro sodo-cálcico presume-se que os 15% necessários para completar 100% da amostra são constituídos por cálcio (CaO), apesar de não terem sido detetados nas análises químicas efetuadas.

O quadro 3.6 mostra a composição mineralógica qualitativa correspondente às pozolanas utilizadas, obtida por difractometria de raios X (DRX).

Quadro 3.6 - Composição mineralógica dos materiais pozolânicos.

Material	Constituição Mineralógica
Cinzas de Biomassa	Quartzo (SiO ₂), Calcite (CaCO ₃), Microclina (KAlSi ₃ O ₈)
Metacaulino	Quartzo, Anatase (TiO ₂), Moscovite (KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH)1.8F0.2)
Pó de Vidro	Calcite (CaCO ₃)

3.2 Ensaio de caracterização dos materiais e da reatividade pozolânica

3.2.1 Baridade

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 1097-3 [IPQ, 2002b], para determinar a massa de material granular seco que preenche um recipiente de volume conhecido. Determinar a baridade dos constituintes é essencial para estabelecer a relação entre o traço volumétrico e o traço ponderal de uma mistura, permitindo saber as dosagens exatas de cada material a utilizar no laboratório.

O ensaio iniciou-se pela determinação do volume do recipiente (V). Este foi preenchido com água e tapado com uma placa acrílica, de modo a impedir a existência de bolhas de ar entre a superfície da água e da placa. O conjunto foi pesado numa balança com precisão de 0,1g e a temperatura da água foi medida com o auxílio de um termómetro de mercúrio. A massa do recipiente e da placa foram previamente determinadas, permitindo assim determinar a massa de água do recipiente ($m_{\text{água}}$). Através da temperatura da água é sabida a sua massa volúmica (ρ), podendo então calcular-se o volume do copo pela seguinte expressão:

$$V = \frac{m_{\text{água}}}{\rho}$$

em que:

V – volume do copo [dm³]

$m_{\text{água}}$ – massa de água [Kg]

ρ – massa volúmica [Kg/dm³]

Após o cálculo do volume do recipiente, este é colocado de modo a que o seu aro se encontre a 73mm do bordo inferior do funil de sólidos. O material a ensaiar é vertido para o copo através do funil, de uma forma gradual e com velocidade constante, até este ficar completamente saturado, formando um cone no seu cimo. De seguida, com o auxílio de uma régua metálica, o material é rasado lentamente até ficar ao nível dos bordos do recipiente sem o compactar. O recipiente depois de rasado é pesado. Através da diferença entre a massa do recipiente cheio e vazio obtém-se a massa da amostra (m), podendo assim ser calculada a baridade:

$$Ba = \frac{m}{V}$$

Em que:

Ba – baridade [g/cm^3]

m – massa da amostra de material [g]

V – capacidade do recipiente [cm^3]

Tanto o volume do recipiente como a baridade de cada material foram calculados pela média de três medições. A baridade dos materiais utilizados neste trabalho apresentam-se no quadro 3.7.

Quadro 3.7 - Baridade dos materiais utilizados.

Baridade [g/cm^3]	
APAS 12	1,412
APAS 20	1,405
APAS 30	1,388
Mistura de areias	1,463
Cal Aérea	0,35
Cimento Portland	1,146
Cinzas de Biomassa	0,572
Metacaulino	0,294
Pó de Vidro	0,856

3.2.2 Ensaio de Chapelle modificado

Este ensaio foi desenvolvido de acordo com a norma NF P 18-513 [AFNOR, 2012] e o procedimento pode ser dividido em três fases: preparação, filtragem e titulação ácido-base. Ensaíram-se por este método as cinzas de biomassa, o metacaulino e o pó de vidro.

Foi montado um sistema de reação composto por copo de precipitação de 500 ml de capacidade, placa de aquecimento e agitação e um agitador magnético. Foram ainda utilizados um termómetro e uma coluna de refrigeração, para controlar a temperatura e evitar a evaporação.

Como reagentes foram utilizados o carbonato de cálcio, água destilada e descarbonatada, sacarose, indicador de fenolftaleína e uma solução de ácido clorídrico a 0,1M.

O procedimento consiste em colocar 250 ml de água destilada e descarbonatada no copo de precipitação, a que se adicionam 1 g de pozolana e 2g de CaO^1 , sob agitação, num agitador magnético tal como se mostra na Figura 3.4. A pozolana fica a reagir com a cal durante 16 horas sob agitação e a uma temperatura de $85\pm 5^\circ\text{C}$. Após as 16 horas de reação juntou-se ao copo de precipitação uma solução de 250ml de sacarose² e deixou-se a mistura arrefecer. Quando a temperatura estabilizou, filtrou-se e retiraram-se três tomas de 25 ml cada para um Erlenmeyer (Figura 3.5). Estas tomas foram tituladas com uma solução de HCl 0,1M usando o indicador de fenolftaleína, terminando quando a solução muda a cor de violeta para incolor (Figura 3.6).



Figura 3.4 – Montagem do ensaio de Chapelle.



Figura 3.5 – Filtragem



Figura 3.6 - Titulação ácido-base.

¹ Obtido a partir da calcinação a 900°C de hidróxido de cálcio durante 2 horas.

² 60g de sacarose dissolvidas em 250ml de água destilada e descarbonatada.

O resultado, que corresponde à média final das três tomas, é expresso pela quantidade de portlandite consumida em cada toma de acordo com a seguinte equação:

$$mg[Ca(OH)_2] = 2 \times \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times \frac{74}{56} \times 1000$$

Em que:

V1(ml) - Volume de HCl a 0,1M necessário para a titulação de 25ml da solução ensaiada em branco³.
V2(ml) – Volume de HCl a 0,1M necessário para a titulação de 25ml da solução obtida pela reação da pozolana.

3.2.3 Ensaio de Fratini

Este ensaio, que se encontra normalizado na norma NP EN 196-5 [CEN, 2011] é utilizado para determinar a pozolanicidade de cimentos pozolânicos. Neste trabalho, o ensaio foi realizado em misturas de cimento Portland CEM I- 42,5R com teores de 10%, 30% e 50% de substituição direta de massa de cimento por massa equivalente de pozolana. As pozolanas (cinzas de biomassa, metacaulino e pó de vidro) foram misturadas com o cimento nas devidas proporções, homogeneizadas e recolhidas amostras de 20g através do método de esquartelamento⁴.

Para além das combinações de cimento e pozolana já descritas, foram utilizados os seguintes reagentes: solução de ácido clorídrico diluído a 0,1M⁵, indicador de alaranjado de metilo, solução de hidróxido de sódio⁶, solução de EDTA a 0,03M⁷ e indicador de calcon⁸.

A solução de HCl a 0,1M e a de EDTA a 0,03M, depois de realizadas foram aferidas de modo a determinar o fator de normalidade, obtendo-se concentrações iguais a 1,0031 e 1,0035, respetivamente.

³ O ensaio em branco refere-se à replicação deste mesmo ensaio mas sem o uso de pozolana, servindo como base de qualquer reação que possa ocorrer entre a portlandite existente no sistema.

⁴ Consiste em dividir a mistura de cimento homogeneizada em várias partes, recolhendo a amostra de partes alternadas.

⁵ Juntou-se num balão com 500ml de água destilada 8,5ml de ácido clorídrico concentrado ($\rho=1,18g/cm^3$ a 1,19 g/cm³), perfazendo com água até 1000ml.

⁶ Dissolveu-se 10 ± 0,1g de hidróxido de sódio (NaOH) em água perfazendo até 100ml.

⁷ Dissolveu-se 11,17 ± 0,01g de EDTA em água perfazendo até 1000ml e guardado em recipiente de polietileno estanque.

⁸ Moeu-se 1,0 ± 0,1g de calcon, 2-hidróxi-4-(2-hidróxi-1-naftilazo) naftaleno-1-sulfonato de sódio, (EriochromeBlue-Black R) com (100 ± 1) g de sulfato de sódio anidro (Na₂SO₄).



Figura 3.7 – Reagentes usados no ensaio de Fratini: HCl a 0,1M, EDTA a 0,03M, solução de hidróxido de sódio e indicadores de alaranjado de metilo e de calcon.

Após a preparação do material a ensaiar, introduziu-se no recipiente de polietileno 100ml de água destilada e descarbonatada, colocando-se na estufa termostatizada com temperatura regulada a $40\pm 1^\circ\text{C}$, durante cerca de uma hora. Estabilizada a temperatura, retirou-se o recipiente da estufa e introduziu-se, através de um funil de tubo largo, 20g do cimento pozolânico a ensaiar. Fechou-se de imediato o recipiente e aplicou-se uma agitação horizontal, em movimentos de rotação, durante 20 segundos para evitar a formação de grumos, recolocando-se na estufa. O processo fora da estufa foi efetuado o mais rapidamente possível (num 1 minuto no máximo) para evitar o abaixamento da temperatura do conteúdo do recipiente.

Após 8 dias a reagir, retirou-se o recipiente da estufa e filtrou-se a solução, num período inferior a 30 segundos para evitar absorção de dióxido de carbono e um abaixamento da temperatura, e deixou-se arrefecer o filtrado tapado. A determinação da concentração do ião hidróxido ($[\text{OH}^-]$) foi feita através da titulação de 50 ml da solução filtrada, adicionando 10 gotas do indicador de alaranjado de metilo, determinando a alcalinidade total com HCl a 0,1M, sendo o ponto final da titulação a viragem de cor amarela para laranja rosado (Figura 3.8).



Figura 3.8 – Determinação da concentração de OH^- no ensaio de Fratini antes e após da titulação.

Nesta mesma solução, utilizando um eléctrodo de pH, ajustou-se o valor de pH a $12,5 \pm 0,2$ adicionando a solução de hidróxido de sódio. Para a determinação da concentração do óxido de cálcio ([CaO]), efetuou-se a titulação com solução de EDTA 0,03M após se ter adicionado 0,1g do indicador de calcon, determinando-se o ponto final quando o tom da solução muda de violeta para azul (Figura 3.9).

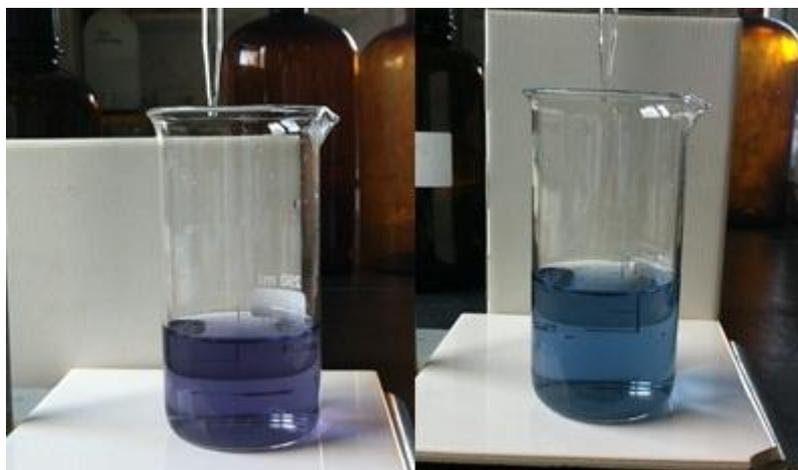


Figura 3.9 – Determinação da concentração de CaO no ensaio de Fratini: solução antes e após a titulação.

Com base no procedimento atrás descrito é possível determinar as concentrações em ião hidroxilo e de óxido de cálcio pelas seguintes equações:

$$[OH^-] = \frac{1000 \times 0,1 \times V3 \times f2}{50} = 2 \times V3 \times f2$$

Em que:

V3 – volume de HCl a 0,1M usada para a titulação, em mililitros.

f2 – fator da solução de ácido clorídrico 0,1 mol/l.

$$[CaO] = \frac{1000 \times 0,03 \times V4 \times f1}{50} = 0,6 \times V4 \times f1$$

Em que:

V4 – volume de EDTA usada para a titulação, em mililitros.

f1 – fator da solução de EDTA.

Se o resultado aos 8 dias indicar que a mistura de cimento em ensaio é pozolânica, deve-se filtrar e determinar as concentrações de OH⁻ e CaO de uma nova solução, da mesma amostra para verificação. No caso contrário, o ensaio é efetuado à idade de 15 dias, sobre os recipientes que permanecem em estufa a $40 \pm 1^\circ\text{C}$.

3.2.4 Índice de Atividade

A determinação do índice de atividade foi realizada com base nos valores de resistência à compressão, resultantes da aplicação da norma EN 1015-11 [CEN, 1999]. Apesar do índice de atividade referido na norma NP EN 450-1 [IPQ, 2012] apenas utilizar as resistências à compressão aos 28 e 90 dias, neste estudo as argamassas foram também ensaiadas à flexão. Segundo aquela norma, o índice de atividade de uma argamassa com pozolanas aos 28 e 90 dias tem de ser superior, respetivamente, a 75% e 85% do valor obtido por uma argamassa apenas de cimento.

Os resultados são então apresentados pela média de três ensaios, denominada de índice de atividade (IA), e que se calcula do seguinte modo:

$$IA = A/B \times 100$$

Onde A é a resistência à compressão (MPa) da argamassa com adição de pozolana (MPa) e B a resistência à compressão (MPa) da argamassa de controlo.

Nos próximos subcapítulos serão descritos o modo de realização e caracterização das argamassas, as condições de cura e o método de determinação da resistência à compressão e flexão, no âmbito da determinação do Índice de Atividade.

3.2.4.1 Planeamento das argamassas e amassaduras

Realizaram-se argamassas com teores de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% das diferentes pozolanas (cinzas de biomassa - CB, metacaulino - MK e pó de vidro - PV) em substituição direta dos ligantes (cal aérea - CL e cimento Portland – CP).

Optou-se por realizar argamassas com traço volumétrico de 1:3 (ligante:agregado), com o mesmo tipo de amassadura e condições de cura, independentemente do tipo de ligante, sabendo de antemão que em termos de resistências as argamassas de cimento resultariam em valores muito superiores às da cal. Isto porque se pretende comparar o comportamento das argamassas relativamente à variação do teor de pozolana, em vez de avaliar a resistência de cada composição.

Como referido anteriormente, o agregado resulta de uma mistura de areias na proporção volumétrica de 1:1,5:1,5 (APAS 12:APAS20:APAS30).

Através do ensaio de espalhamento foi determinada a quantidade de água necessária para as argamassas padrão obterem o espalhamento pretendido, optou-se por manter a mesma quantidade de água para todas as composições devido ao número elevado de diferentes composições existentes neste estudo. No entanto, no caso das argamassas de cal aérea e metacaulino, com a quantidade de água das argamassas padrão os valores de espalhamento atingiam valores muito menores aos pretendidos, optando-se por aumentar essa mesma quantidade. Foram estabelecidas as quantidades de cada componente necessárias para preencher dois moldes (cada molde com 3 provetes para ensaiar a cada uma das idades) e identificadas as argamassas, como se apresenta no quadro 3.8.

Quadro 3.8 -Designação das argamassas, quantidades dos constituintes, traço ponderal e razão água/ligante.

Designação	Pozolana		Ligante		Agregado			Água (ml)	Traço ponderal [Lig.:poz.:agreg.]	Razão Água/Lig.
	(%)	Tipo	(g)	Cem (g)	APAS 12 (g)	APAS 20 (g)	APAS 30(g)			
CP	-	-	-	765,0	708,5	1057,6	1036,4	550	1:0:3,7	0,7
CP_10CB	10%		76,5	688,5	708,5	1057,6	1036,4	550	1:0,1:4,1	0,8
CP_20CB	20%		153,0	612,0	708,5	1057,6	1036,4	550	1:0,3:4,6	0,9
CP_30CB	30%	CB	229,5	535,5	708,5	1057,6	1036,4	550	1:0,4:5,2	1,0
CP_40CB	40%		306,0	459,0	708,5	1057,6	1036,4	550	1:0,7:6,1	1,2
CP_50CB	50%		382,5	382,5	708,5	1057,6	1036,4	550	1:1:7,3	1,4
CP_10MK	10%		76,5	688,5	708,5	1057,6	1036,4	550	1:0,1:4,1	0,8
CP_20MK	20%		153,0	612,0	708,5	1057,6	1036,4	550	1:0,3:4,6	0,9
CP_30MK	30%	MK	229,5	535,5	708,5	1057,6	1036,4	580	1:0,4:5,2	1,1
CP_40MK	40%		306,0	459,0	708,5	1057,6	1036,4	600	1:0,7:6,1	1,3
CP_50MK	50%		382,5	382,5	708,5	1057,6	1036,4	620	1:1:7,3	1,6
CP_10PV	10%		76,5	688,5	708,5	1057,6	1036,4	550	1:0,1:4,1	0,8
CP_20PV	20%		153,0	612,0	708,5	1057,6	1036,4	550	1:0,3:4,6	0,9
CP_30PV	30%	PV	229,5	535,5	708,5	1057,6	1036,4	550	1:0,4:5,2	1,0
CP_40PV	40%		306,0	459,0	708,5	1057,6	1036,4	550	1:0,7:6,1	1,2
CP_50PV	50%		382,5	382,5	708,5	1057,6	1036,4	550	1:1:7,3	1,4
CL	-	-	-	240	726,7	1087,2	1065,4	600	1:0:12	2,5
CL_10CB	10%		24	216	726,7	1087,2	1065,4	600	1:0,1:13,3	2,8
CL_20CB	20%		48	192	726,7	1087,2	1065,4	600	1:0,3:15	3,1
CL_30CB	30%	CB	72	168	726,7	1087,2	1065,4	600	1:0,4:17,1	3,6
CL_40CB	40%		96	144	726,7	1087,2	1065,4	600	1:0,7:20	4,2
CL_50CB	50%		120	120	726,7	1087,2	1065,4	600	1:1:24	5,0
CL_10MK	10%		24	216	726,7	1087,2	1065,4	600	1:0,1:13,3	2,8
CL_20MK	20%		48	192	726,7	1087,2	1065,4	600	1:0,3:15	3,1
CL_30MK	30%	MK	72	168	726,7	1087,2	1065,4	600	1:0,4:17,1	3,6
CL_40MK	40%		96	144	726,7	1087,2	1065,4	600	1:0,7:20	4,2
CL_50MK	50%		120	120	726,7	1087,2	1065,4	600	1:1:24	5,0
CL_10PV	10%		24	216	726,7	1087,2	1065,4	600	1:0,1:13,3	2,8
CL_20PV	20%		48	192	726,7	1087,2	1065,4	600	1:0,3:15	3,1
CL_30PV	30%	PV	72	168	726,7	1087,2	1065,4	600	1:0,4:17,1	3,6
CL_40PV	40%		96	144	726,7	1087,2	1065,4	600	1:0,7:20	4,2
CL_50PV	50%		120	120	726,7	1087,2	1065,4	600	1:1:24	5,0

Depois de terem sido estabelecidas as quantidades necessárias de cada componente das argamassas, estas foram então realizadas por processo de amassadura.

Começou-se por pesar as quantidades necessárias dos constituintes para realizar amassadura num tabuleiro, recorrendo-se a uma balança de precisão 0,1g. Homogeneizou-se a mistura manualmente e colocou-se todo o material dentro da cuba da misturadora mecânica.

O processo de amassadura foi desenvolvido de acordo com o procedimento experimental definido no âmbito dos projetos FCT-METACAL e LIMECONTECH, ou seja, colocando o material na cuba misturadora deixa-se a misturar durante 150 segundos, sendo que a água previamente medida em provetas graduadas foi introduzida nos primeiros 15 segundos. Findo este período de mistura, efetua-se uma paragem rápida, para raspar a pá e as paredes da cuba, e liga-se a misturadora por mais 30 segundos.



Figura 3.10 - Misturadora mecânica.

3.2.4.2 Consistência por espalhamento

Realizada a amassadura, procedeu-se à determinação da consistência da argamassa na mesa de espalhamento, método que representa a influência da água na trabalhabilidade.

A quantidade de água utilizada na produção das argamassas foi a necessária à obtenção de um espalhamento na ordem dos 150 ± 10 mm das argamassas de referência (sem pozolanas), sendo que para as argamassas pozolânicas foram mantidas as mesmas quantidades de água, exceto no caso de adição de metacaulino ao cimento, em que se aumentou a quantidade de água para inverter o decréscimo de trabalhabilidade apresentada.

A determinação da consistência foi realizada de acordo com a norma EN 1015-2 [CEN,1998] e efetuada em todas as argamassas. Utilizou-se a mesa de espalhamento, o cone metálico e o varão de compactação, que foram humedecidos a cada vez da sua utilização. Colocou-se o cone no centro da mesa, e preencheu-se até meio com argamassa, compactando com 10 piloadas para reduzir os vazios. Preencheu-se por completo o cone, repetiu-se a compactação, retirou-se o anel do cone e rasou-se para retirar o excesso. Retirou-se o cone e, através da rotação da manivela da mesa, aplicaram-se 15 quedas em 15 segundos, medindo-se o diâmetro da amostra em 4 direções com o auxílio de uma craveira. O valor do espalhamento de cada argamassa corresponde à média das leituras efetuadas.



Figura 3.11 – Determinação da consistência por espalhamento: imagem antes e depois das 15 quedas.

Foram determinadas as consistências por espalhamento para todas as argamassas realizadas, como se pode ver no Quadro 3.9.

Quadro 3.9 - Espalhamento médio das argamassas.

Ligante		Cimento Portland CEM I 42,5R														
Teor de pozolana	-	10%	20%	30%	40%	50%	10%	20%	30%	40%	50%	10%	20%	30%	40%	50%
Pozolana	-	Cinzas de Biomassa					Metacaulino					Pó de Vidro				
Espalhamento (mm)	151	149	153	151	150	154	156	152	146	156	149	162	165	165	164	167
Ligante		Cal aérea														
Teor de pozolana	-	10%	20%	30%	40%	50%	10%	20%	30%	40%	50%	10%	20%	30%	40%	50%
Pozolana	-	Cinzas de Biomassa					Metacaulino					Pó de Vidro				
Espalhamento (mm)	146	144	134	134	143	148	148	151	141	131	127	140	144	139	138	138

3.2.4.3 Realização dos provetes e condições de cura

Após a realização da amassadura e determinados os valores de espalhamento, procede-se ao preenchimento dos moldes para a realização dos provetes.

Foram utilizados moldes metálicos prismáticos com dimensões 40x40x160mm, com capacidade para 3 provetes cada um, untados previamente com óleo descofrante para facilitar a posterior desmoldagem dos provetes. Preencheram-se os moldes com duas camadas iguais de argamassa (cerca de metade da altura do molde), sendo cada camada compactada com 25 pancadas executadas com o pilão de secção quadrada (12mm de lado) em material plástico não absorvente. A compactação é finalizada com o levantamento até 30° com a horizontal do molde, deixando cair 2 vezes em cada uma das direções (8 quedas no total). O excesso de argamassa dos moldes foi retirado, deixando a superfície da argamassa plana e ao mesmo nível do molde, colocando-se de seguida dentro de um saco de polietileno.



Figura 3.12 - Conservação do molde em saco de polietileno fechado.

As condições de cura foram aplicadas de acordo com a norma EN 1015-11 [CEN, 1999]. As argamassas ficaram os primeiros 7 dias dentro do saco de polietileno, com ligeira diferença para o período de desmoldagem. As argamassas de cal aérea foram desmoldadas em média entre os 3 e 4 dias após serem removidas do saco de polietileno, devido ao lento processo de formação de presa, contrariamente à desmoldagem prevista ao 5º dia após realização da amassadura definido pela norma. As argamassas de cimento Portland desmoldaram-se no 2º dia, sendo retiradas ao 7º dia do saco de polietileno e guardadas num sala climatizada, com humidade relativa de $65 \pm 5\%$ e temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$.



Figura 3.13 - Provetes de argamassa identificados e guardados em sala climatizada.

3.2.4.4 Resistência à flexão e à compressão

A determinação da resistência à compressão e à flexão foram realizadas aos 28 e 90 dias para cada tipo de argamassa. Antes de se proceder ao ensaio mediram-se os provetes em comprimento, largura e altura com o auxílio de uma craveira e pesaram-se numa balança com precisão de 0,01g.



Figura 3.14 - Medição e pesagem dos provetes de argamassa.

Para determinar a resistência à flexão e à compressão foram utilizados 3 provetes por cada tipo de argamassa e por cada data de ensaio (28 ou 90 dias).

Este ensaio foi realizado no laboratório de ensaios de revestimentos de paredes no LNEC segundo a norma EN 1015-11 [CEN, 1999]. Primeiramente determina-se a resistência à flexão do provete prismático e depois, com as metades sobrantes, ensaia-se à compressão.

O provete prismático de 40x40x160 mm³ foi colocado na prensa de flexão (apoios distanciados por 100mm), de modo a ficar centrado com a força que iria ser aplicada e colocando a face do provete rugosa (face que não esteve em contato com o molde) na vertical para não influenciar o contato com os apoios. Cada prisma foi ensaiado aplicando uma carga pontual a meio vão do provete até se atingir a rotura.



Figura 3.15 - Ensaio de determinação de resistência à flexão.

Através do software do equipamento registou-se a força máxima aplicada no provete que levou à sua rotura (F). A força foi aplicada dentro do intervalo 10N/s a 50N/s com o objetivo de provocar a rotura do provete entre os 30 e 90 segundos, tal como refere a norma. Devido à diferença de resistências apresentadas entre as argamassas de cal aérea e de cimento Portland, notou-se a utilização da velocidade mínima para a maioria das argamassas de cal aérea e a velocidade máxima para as restantes.

A resistência à flexão (Rf) foi calculada através da seguinte expressão:

$$Rf = 1,5 \times \frac{F \times l}{b \times d^2}$$

Sendo:

Rf – Resistência à flexão [MPa]

F – Força máxima aplicada no provete [N]

l – Distância entre os dois apoios que suportam o provete [mm]

b – Espessura do provete [mm]

d – Profundidade do provete [mm]

Para a determinação da resistência à compressão, conforme já descrito, foram utilizadas as duas metades sobrantes do ensaio à flexão. Foi colocado meio provete na prensa de modo a que as faces de contato entre o provete e a prensa sejam as faces mais lisas (que estiveram em contato com o molde). Centrada a amostra com o aparelho, aplicou-se uma carga contínua a uma velocidade entre os 50 e 500 N/s, para que a rotura ocorresse no período entre os 30 e 90 segundos (Figura 3.16).



Figura 3.16 - Ensaio de resistência à compressão.

A resistência à compressão (em MPa) foi determinada dividindo a força máxima (em N) pela área transversal da prensa de compressão (1600 mm²).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios de reatividade pozolânica, aos materiais e de acordo com os procedimentos apresentados no capítulo anterior. Primeiramente apresentam-se os resultados de cada ensaio individualmente, seguindo-se a análise de resultados em conjunto, procurando avaliar a existência de comportamentos similares ou algum tipo de correlação entre os diferentes ensaios.

4.1 Resultados individuais de cada ensaio

4.1.1 Ensaio de Chapelle

Neste ensaio os resultados exprimem o consumo, em mg de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), de 1 grama de pozolana. No Quadro 4.1 e na Figura 4.1 apresentam-se os resultados obtidos, tal como o respetivo desvio padrão e coeficiente de variação. Esses resultados foram comparados com o valor de referência de 700 mg de consumo de Ca(OH)_2 , apresentado pela norma francesa NF P 18-513 [AFNOR, 2012] para metacaulinos.

Quadro 4.1- Resultados obtidos no ensaio de Chapelle.

Pozolana	Consumo (mg de Ca(OH)_2)	DP	CV (%)
Cinzas de Biomassa	518,5	47,7	9,4
Metacaulino	1342,2	103,3	7,7
Pó de Vidro	1120,3	107,5	9,6

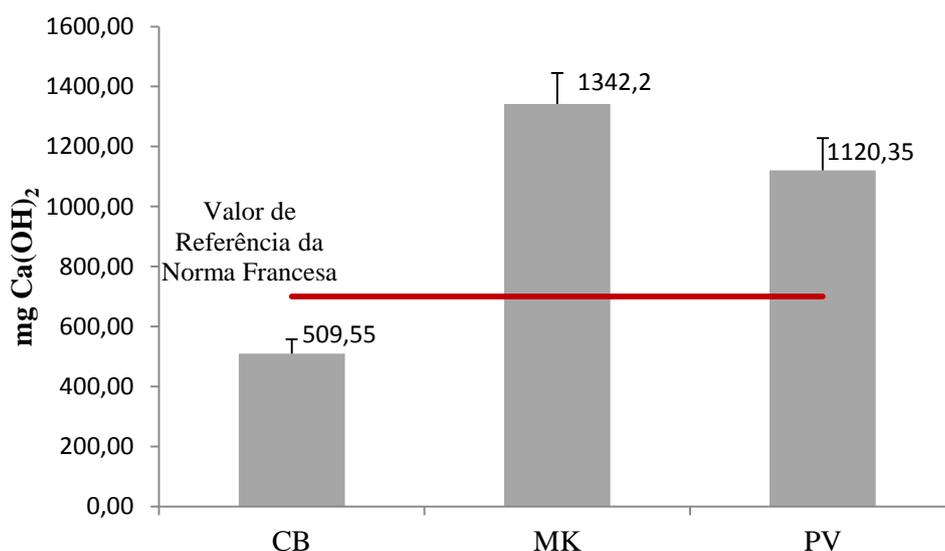


Figura 4.1 - Resultados obtidos no ensaio de Chapelle e comparação do consumo de cal com valor de referência da norma NF P 18-513.

De acordo com os resultados obtidos na Figura 4.1, somente as cinzas de biomassa não apresentam um valor que as classifique, segundo a norma (para metacaulinos), como conforme em termos de pozolanicidade.

4.1.2 Ensaio de Fratini

Como foi referido anteriormente, neste ensaio as misturas que não tenham evidenciado pozolanicidade aos 8 dias são ensaiadas aos 15 dias para verificar se são ou não pozolânicas. Os materiais são avaliados em termos da sua pozolanicidade, com base na posição no gráfico de resultados, em que o eixo das abcissas representa os valores de concentração em óxido de cálcio [CaO] e o eixo das ordenadas apresenta os valores de concentração em ião hidroxilo [OH⁻], obtidos aos 8, ou aos 15 dias de ensaio. Nos Quadro 4.2 e Quadro 4.3 apresentam-se os resultados obtidos para os três materiais em estudo, respetivamente aos 8 e 15 dias de reação.

Quadro 4.2 - Resultados do ensaio de Fratini aos 8 dias

Designação	Teor (%)	8 Dias		Resultado
		[OH ⁻]mmol/l	[CaO] mmol/l	
CB	10	69,5	8,6	Não pozolânico
	30	67,6	5,6	Pozolânico
	50	68,8	4,7	Pozolânico
MK	10	59,7	5,9	Pozolânico
	30	31,1	0,5	Pozolânico
	50	2,5	0,2	Pozolânico
PV	10	68,5	8,5	Não pozolânico
	30	68,6	7,7	Não pozolânico
	50	64,1	5,3	Pozolânico

Quadro 4.3 - Resultados do ensaio de Fratini aos 15 dias.

Designação	Teor (%)	15 Dias		Resultado
		[OH ⁻]mmol/l	[CaO] mmol/l	
CB	10	72,1	8,2	Não Pozolânico
PV	10	75,5	7,8	Não Pozolânico
	30	78,6	4,5	Pozolânico

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que, somente as misturas com 10% de cinzas de biomassa e 10% de pó de vidro não satisfazem o ensaio de pozolanicidade em qualquer um dos períodos de ensaio analisados.

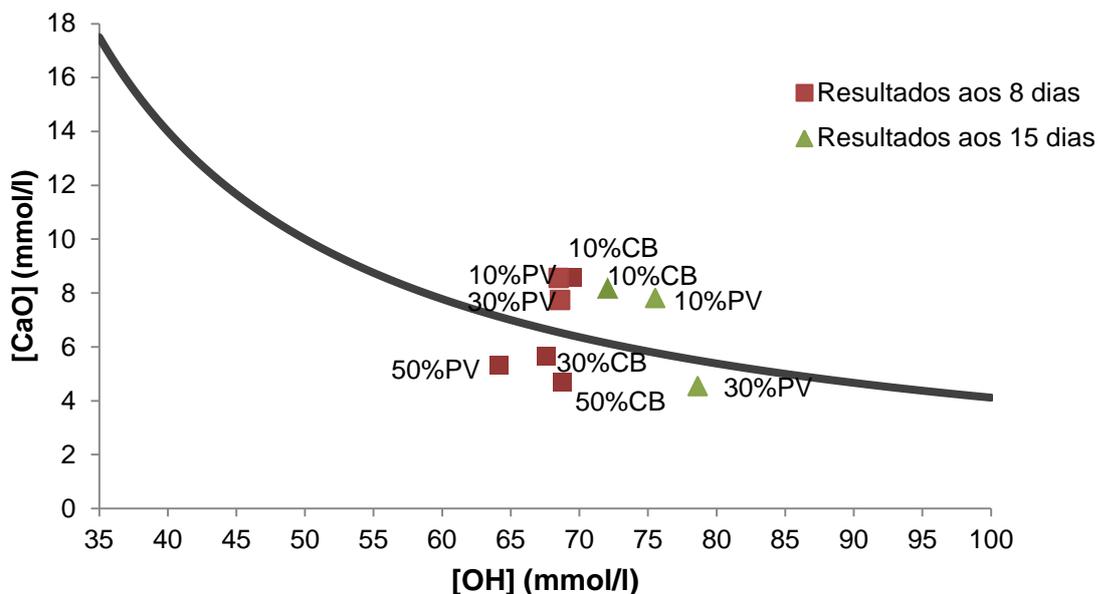


Figura 4.2 - Resultados do ensaio de Fratini para misturas de cimento com pó de vidro (PV) ou cinzas de biomassa (CB).

Quer as CB como o PV apresentam um comportamento algo semelhante nos resultados aos 8 dias, sendo considerados pozzolânicos os cimentos que incorporam 50% dessas pozzolanas; por outro lado, os cimentos com teores mais reduzidos (10%) são considerados não pozzolânicos. Os cimentos com 30% de CB ou PV são ambos classificados de pozzolânicos, embora as CB necessitem de apenas de 8 dias, enquanto o PV precisa de 15 dias. Com base neste comportamento poder-se-á considerar que as CB são ligeiramente mais reativas que o PV, o que contraria a avaliação efetuada anteriormente pelo método de Chapelle.

Nota-se que, à medida que o teor de CB ou PV aumenta, há, em geral, uma diminuição das concentrações de [CaO] e de [OH], sendo essa diminuição menos marcada para o ião hidroxilo.

As misturas de cimento com metacaulino (Figura 4.3) caracterizam-se neste ensaio por apresentarem, comparativamente com os outros dois materiais, consumos elevados de [CaO] e de [OH]. As misturas com 20% e 30% MK apresentam valores fora do limite inferior da curva de solubilidade do óxido de cálcio, o que pode ser interpretado como tendo elevada reatividade. De salientar, ainda, que a mistura com 10% de metacaulino foi a única dos três materiais ensaiados com este teor de substituição que é considerada pozzolânica com 8 dias de reação, sinal que dos três materiais ensaiados, o metacaulino é aquele que terá maior reatividade pozzolânica, facto que está em concordância com o maior valor de reatividade obtido no ensaio Chapelle.

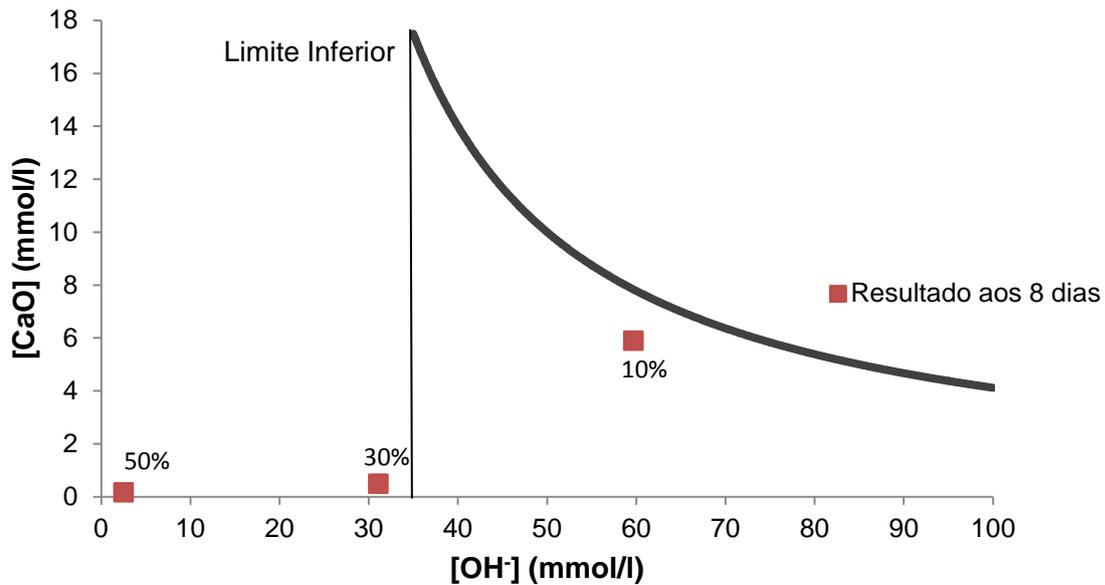


Figura 4.3 – Resultados do ensaio de Fratini para misturas de cimento com metacaulino (MK).

4.1.3 Resistências Mecânicas à flexão e compressão

As resistências mecânicas das argamassas foram caracterizadas recorrendo aos ensaios de flexão e de compressão, efetuados sobre provetes prismáticos de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$.

Para determinar a resistência à flexão utilizaram-se 3 provetes por cada composição e em cada idade. Os ensaios de resistência à compressão foram efetuados nos provetes resultantes do ensaio à flexão, utilizando-se neste caso um mínimo de 6 provetes por composição e em cada idade. Ambas as resistências foram determinadas pela média da tensão individual de cada provete e o respetivo desvio padrão.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão (R_c) e à flexão (R_f) foram interpretados em conjunto para cada um dos materiais ensaiados e por tipo de ligante.

4.1.3.1 Argamassas de cimento Portland

No Quadro 4.4 apresentam-se os resultados obtidos de acordo com a norma EN 1015-11 [CEN, 1999] e respetivos desvios-padrão referentes às argamassas de cimento Portland.

Quadro 4.4 – Valores de resistência à compressão e à flexão para argamassas de cimento Portland com diferentes tipos e teores de pozolana.

Designação	28 Dias		90 Dias		28 Dias		90 Dias	
	Rc (MPa)	D.P.	Rc (MPa)	D.P.	Rf (MPa)	D.P.	Rf (MPa)	D.P.
CP	25,9	4,45	27,5	3,87	6,7	0,43	3,9	0,06
CP_10CB	25,9	1,24	30,0	1,17	5,7	0,38	3,9	0,20
CP_20CB	25,4	0,88	26,6	0,92	6,3	0,35	5,7	0,15
CP_30CB	3,5	0,67	4,3	1,56	1,3	0,30	1,2	0,06
CP_40CB	3,0	0,18	3,4	0,82	1,1	0,08	1,0	0,03
CP_50CB	2,6	0,25	1,7	0,12	0,6	0,03	0,5	0,03
CP_10MK	17,7	0,74	18,1	1,23	4,1	0,10	3,6	0,09
CP_20MK	20,6	0,68	22,8	3,75	4,5	0,28	3,4	0,44
CP_30MK	15,1	1,26	27,2	1,82	2,8	0,16	2,1	0,25
CP_40MK	18,9	2,63	19,3	4,87	2,4	0,12	1,6	0,25
CP_50MK	21,4	1,70	20,6	0,71	1,8	0,08	1,5	0,40
CP_10PV	23,7	1,79	24,8	1,03	5,4	1,43	3,9	0,40
CP_20PV	19,2	0,58	22,3	0,81	4,9	1,14	3,6	0,18
CP_30PV	17,1	0,58	18,0	1,04	3,1	0,18	3,5	0,36
CP_40PV	13,3	0,62	16,1	0,28	3,2	1,23	2,9	0,10
CP_50PV	10,7	0,73	12,0	0,36	3,8	0,32	2,1	0,44

Relativamente à variação das resistências mecânicas das argamassas de cimento Portland ao longo do tempo, verifica-se na maioria dos casos o aumento da Rc dos 28 para os 90 dias, enquanto a Rf apresenta um comportamento inverso, ou seja, uma diminuição dos seus valores ao longo do tempo.

As figuras 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam, respetivamente, a evolução com a idade das argamassas de cimento Portland e cinzas de biomassa, metacaulino e pó de vidro.

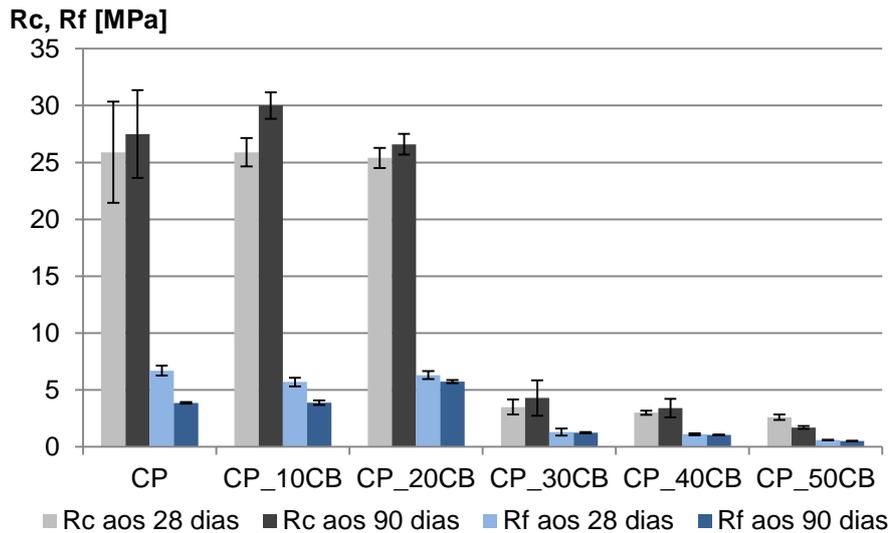


Figura 4.4 – Evolução com a idade das resistências mecânicas de argamassas de cimento Portland e cinzas de biomassa.

Analisando os dados da Figura 4.4, constata-se que apenas as composições constituídas por 10% e 20% de cinzas de biomassa apresentam por resistências mecânicas semelhantes às da argamassa de controlo. Para teores de substituição de CB superiores a 20% verifica-se um decréscimo abrupto das resistências mecânicas. Segundo Udoeyo et al. (2006) o facto das resistências mecânicas se manterem semelhantes à argamassa de controlo para baixos teores e diminuírem abruptamente com o seu aumento é justificado pelo facto das partículas de cinzas de biomassa poderem funcionar mais como “filler” do que propriamente como ligante. Assim, o aumento do teor de cinzas em detrimento da diminuição do teor de cimento resulta no aumento da área superficial do material de enchimento que é ligado por uma menor quantidade de pasta de cimento, provocando uma diminuição da resistência mecânica.

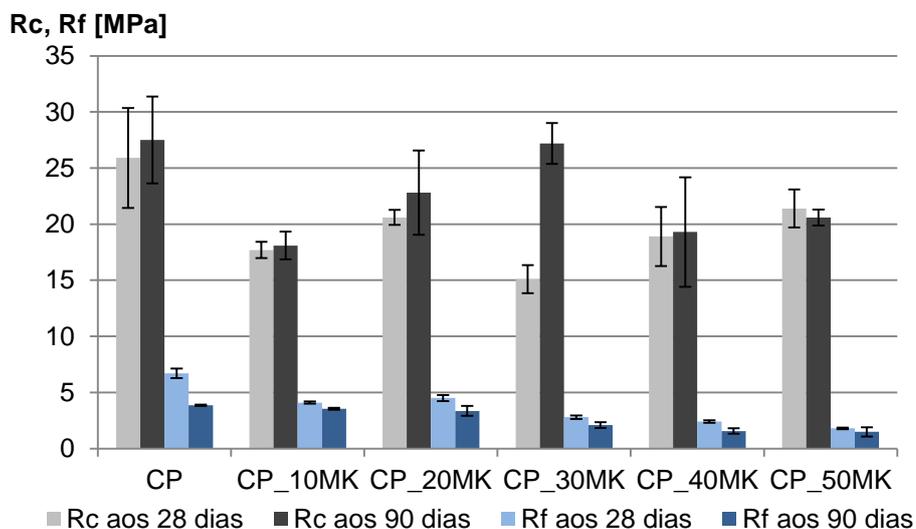


Figura 4.5 – Evolução com a idade das resistências mecânicas de argamassas cimento Portland e metacaulino.

Na Figura 4.5 os resultados apresentados relativos às argamassas de cimento e metacaulino revelam que apenas a Rc da argamassa CP_30MK aos 90 dias e a Rf aos 90 dias das argamassas CP_10MK e CP_20MK apresentam valores de resistências equivalentes às da argamassa de controlo. Em termos de Rc verifica-se que as composições com 20% e 50% de MK são as que exibem valores mais elevados a ambas as idades. Com o aumento do teor de substituição de MK, verifica-se um decréscimo de Rf em ambas as idades, embora com a particularidade da argamassa com teor de 20% apresentar uma resistência superior à com 10%.

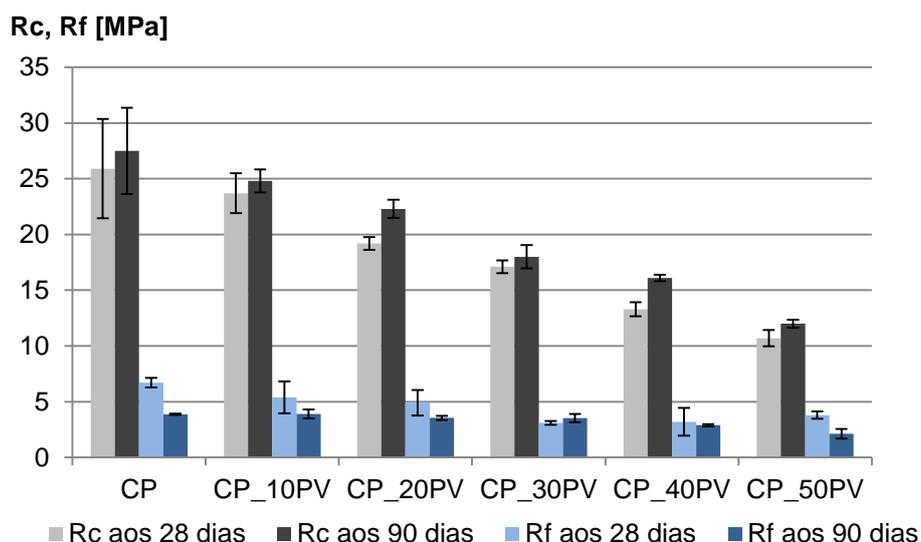


Figura 4.6 – Evolução com a idade das resistências mecânicas de argamassas de cimento Portland e pó de vidro.

Nas argamassas com diferentes teores de PV, registou-se a diminuição de ambas as resistências em proporcionalidade ao aumento do teor de pozolana, com a exceção da Rf aos 28 dias que apresenta um ligeiro aumento para teores superiores a 30%.

4.1.3.2 Argamassas de cal aérea

Como previsto durante o planeamento das amassaduras, as resistências mecânicas apresentadas pelas argamassas de cal aérea são muito inferiores aos valores registados pelas argamassas de cimento Portland. Para além de se tratar de um ligante reconhecidamente mais fraco ao nível de resistências mecânicas, é também sabido que estas desenvolvem-se mais lentamente, acompanhando o processo de carbonatação de argamassas só de cal aérea, ou de carbonatação e reação pozolânica em argamassas de cal e pozolanas. No quadro seguinte apresentam-se os resultados obtidos aos 28 e 90 dias para as argamassas de cal aérea com diferentes teores de pozolana.

Quadro 4.5 – Valores de resistência à compressão e à flexão para argamassas de cal aérea com diferentes tipos e teores de pozolana.

Designação	28 Dias		90 Dias		28 Dias		90 Dias	
	Rc (MPa)	D. P.	Rc (MPa)	D.P.	Rf (MPa)	D. P.	Rf (MPa)	D.P.
CL	0,17	0,05	0,53	0,03	0,22	0,08	0,35	0,00
CL_10CB	0,23	0,03	0,44	0,02	0,20	0,00	0,15	0,00
CL_20CB	0,19	0,04	0,43	0,03	0,25	0,05	0,23	0,03
CL_30CB	0,18	0,03	0,19	0,04	0,17	0,06	0,17	0,03
CL_40CB	0,13	0,06	0,13	0,03	0,07	0,03	0,10	0,05
CL_50CB	0,08	0,03	0,08	0,03	0,05	0,03	0,05	0,00
CL_10MK	0,18	0,03	0,28	0,03	0,08	0,03	0,10	0,05
CL_20MK	0,78	0,06	0,76	0,04	0,30	0,05	0,28	0,03
CL_30MK	1,31	0,14	1,36	0,07	0,47	0,03	0,35	0,09
CL_40MK	2,04	0,12	1,86	0,14	0,55	0,05	0,50	0,09
CL_50MK	2,63	0,04	2,60	0,08	0,73	0,16	0,87	0,20
CL_10PV	0,15	0,00	0,43	0,03	0,18	0,06	0,30	0,05
CL_20PV	0,23	0,07	0,48	0,03	0,22	0,03	0,32	0,03
CL_30PV	0,15	0,00	0,33	0,04	0,13	0,03	0,20	0,05
CL_40PV	0,29	0,05	0,38	0,03	0,20	0,05	0,15	0,05
CL_50PV	0,15	0,00	0,13	0,03	0,08	0,03	0,13	0,03

Segundo o Quadro 4.5, verifica-se que a Rc das argamassas de cal aérea tende a aumentar entre os 28 e 90 dias, enquanto a Rf regista um comportamento constante, sem grandes variações no período de tempo entre 28 e 90 dias. As figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam, respetivamente, a evolução com a idade das argamassas de cal aérea e cinzas de biomassa, metacaulino e pó de vidro.

Na figura 4.7, verifica-se que as argamassas com teor de CB entre 10 e 30% apresentam resistências mecânicas aos 28 dias equivalentes às da argamassa de controlo, notando-se a melhoria da Rf aos 28 dias pela CL_20CB relativamente à CL. Nas argamassas com diferentes teores de CB verificou-se que há uma tendência de diminuição das resistências à flexão dos 28 para os 90 dias, apresentando os valores constantes ou até mesmo inferiores para as diferentes datas, contrariamente ao que ocorre com a composição de controlo. O mesmo ocorre com a resistência à compressão para teores superiores a 20%. Sobressai o grande incremento de Rc dos 28 para os 90 dias das argamassas com até 20% de CB.

Em termos comparativos às argamassas com cimento Portland verifica-se um comportamento similar, isto é, os teores até 20% de substituição apresentam valores semelhantes aos da argamassa de controlo.

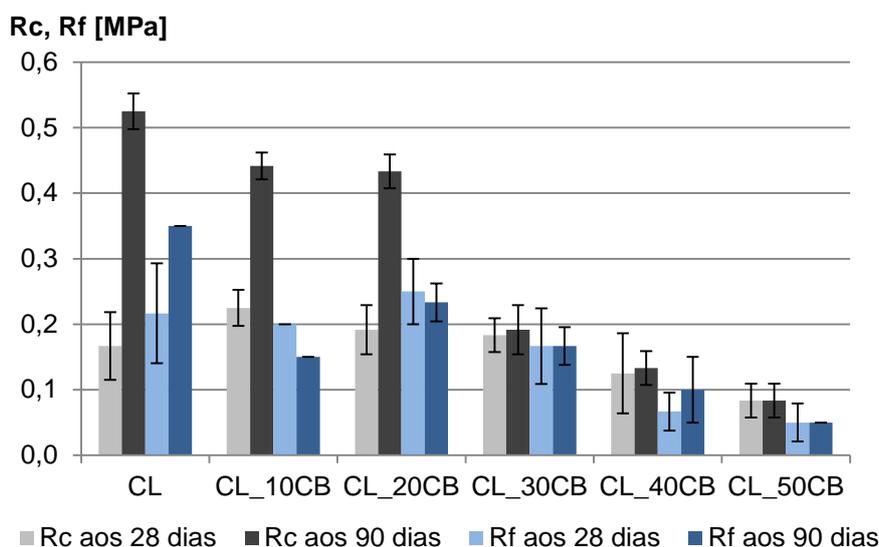


Figura 4.7 Evolução com idade das resistências mecânicas de argamassas de cal aérea e cinzas de biomassa.

Analisando a figura 4.8 constatou-se que as argamassas de cal aérea e metacaulino aumentam a resistência mecânica, para o intervalo de teores apresentado, proporcionalmente ao incremento do teor de substituição. Verificou-se também que apenas a composição CL_10MK apresentou valores de Rc e Rf inferiores aos da argamassa de controlo. Nota-se que as argamassas compostas por metacaulino têm tendência a obter resistências iniciais mais elevadas (aos 28 dias), mantendo-se os valores sem grandes aumentos nem diminuições até aos 90 dias. Esta característica é comprovada pelo comportamento verificado nos ensaios de Chapelle e de Fratini, em que o metacaulino mostrou reagir fortemente com a cal.

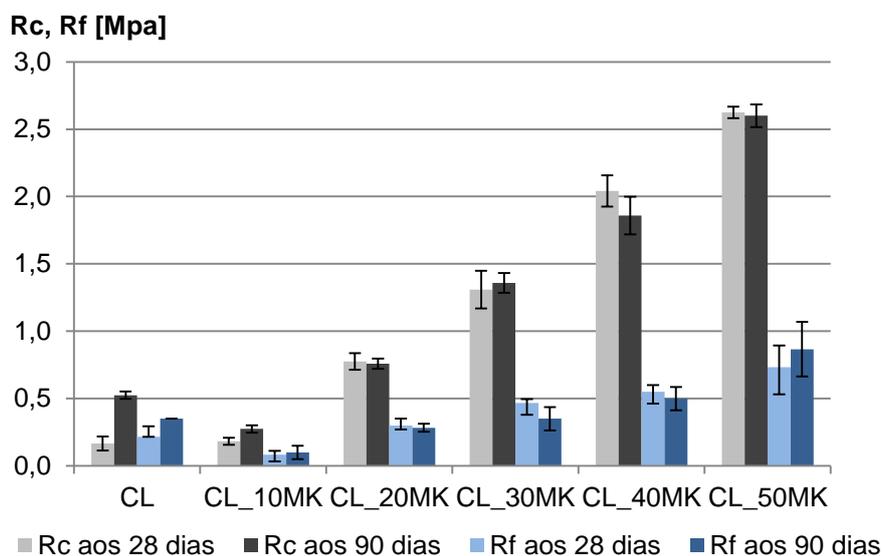


Figura 4.8 – Evolução com a idade das resistências mecânicas de argamassas de cal aérea e metacaulino.

Pela figura 4.9 pode-se comprovar que a incorporação de 20% de pó de vidro em argamassas de cal aérea reproduz resistências equivalentes à argamassa de controlo. A argamassa CL_10PV apresenta comportamento idêntico à CL aos 28 dias, porém nota-se um ligeiro

abaixamento de resistência nos ensaios realizados aos 90 dias. Em termos de resistência à compressão aos 28 dias os resultados foram constantes, não apresentando grandes variações com o aumento do teor de substituição. As composições com teores superiores a 30% de PV, inclusive, manifestaram inconsistência nas suas resistências, apresentando valores inferiores à argamassa CL, principalmente em termos de Rf.

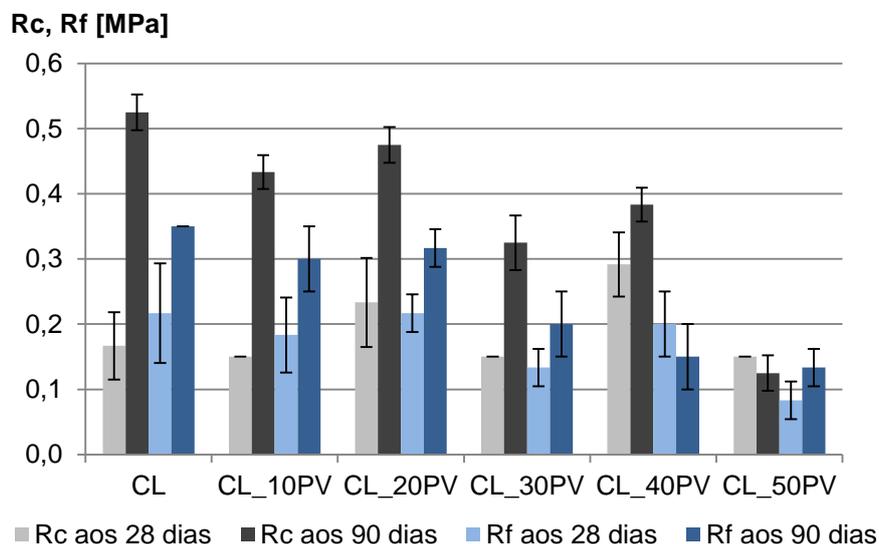


Figura 4.9 - Resistências mecânicas das argamassas de cal aérea e pó de vidro.

4.1.4 Índice de Atividade

4.1.4.1 Argamassas de cimento Portland e pozolanas

O índice de atividade foi calculado com base nos resultados das resistências à compressão apresentados no subcapítulo anterior. No Quadro 4.6 apresentam-se os resultados obtidos de acordo com a norma NP EN 450-1 [IPQ 2012] para as argamassas de cimento Portland constituídas por diferentes teores pozolana.

Quadro 4.6 - Resultados do Índice de Atividade para as argamassas de cimento Portland.

Designação	28 Dias (%)	90 Dias (%)	Varição 28-90 (%)
CP_10CB	100,0	109,1	9,1
CP_20CB	98,1	96,7	-1,3
CP_30CB	13,5	15,6	2,1
CP_40CB	11,6	12,4	0,8
CP_50CB	10,0	6,2	-3,9
CP_10MK	68,3	65,8	-2,5
CP_20MK	79,5	82,9	3,4
CP_30MK	58,3	98,9	40,6
CP_40MK	73,0	70,2	-2,8
CP_50MK	82,6	74,9	-7,7
CP_10PV	91,5	90,2	-1,3
CP_20PV	74,1	81,1	7,0
CP_30PV	66,0	65,5	-0,6
CP_40PV	51,4	58,5	7,2
CP_50PV	41,3	43,6	2,3

Os resultados do índice de atividade (IA) mostram que todos os materiais estudados apresentam valores de resistência à compressão inferiores aos da argamassa padrão, à exceção da composição CP_10CB. Contudo, segundo a norma NP EN 450-1 [IPQ, 2012], são considerados pozolânicos os materiais que apresentam aos 28 dias valores de IA superiores a 75% do valor de referência e de 85% aos 90 dias. Com base nos resultados obtidos verifica-se que somente as composições CP_10CB, CP_20CB e CP_10PV são consideradas pozolânicos.

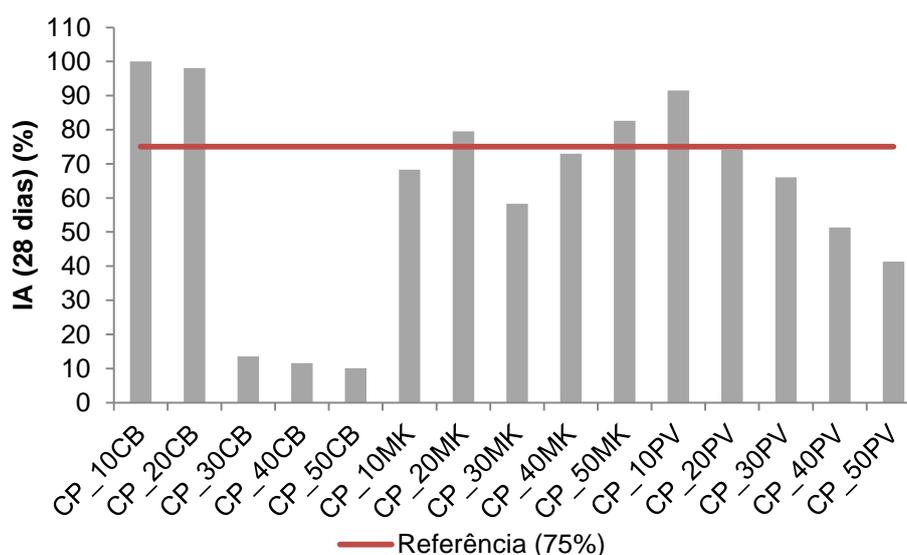


Figura 4.10 - Resultado do índice de atividade aos 28 dias das argamassas de cimento Portland com diferentes teores de pozolana.

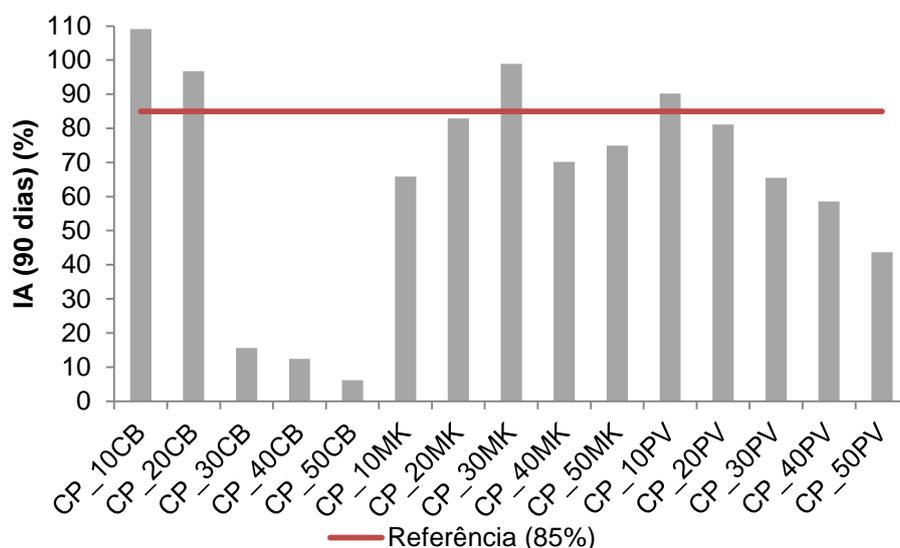


Figura 4.11 - Resultado do índice de atividade aos 90 dias das argamassas de cimento Portland com diferentes teores de pozolana.

Dos resultados obtidos, é curioso reparar que as formulações constituídas por 20% de metacaulino e de pó de vidro, apresentam resistência à compressão apenas ligeiramente inferiores às exigidas para se poderem caracterizar como pozolânicas. Pela análise da Figura 4.10 e Figura 4.11, comprova-se o comportamento linear das argamassas com pó de vidro, em que a resistência à compressão diminui com o aumento do teor de pozolana, comparativamente com a argamassa de controlo.

4.1.4.2 Argamassas de cal aérea e pozolanas

Na norma NP EN 450-1 [IPQ, 2012] apenas é mencionada a utilização do índice de atividade para argamassas de cimento Portland. Devido à diferença existente entre resistências mecânicas registadas entre as argamassas de cal aérea e de cimento Portland, optou-se por efetuar a média dos valores de resistência arredondando à centésima, permitindo desta forma o IA mais preciso e esclarecedor. No Quadro 4.7 apresentam-se os resultados obtidos com base na NP EN 450-1 [IPQ, 2012] mas referente às argamassas de cal aérea.

Quadro 4.7 - Resultados do Índice de Atividade para as argamassas de cal aérea.

Designação	28 Dias (%)	90 Dias (%)	Varição 28-90 (%)
CL_10CB	135,0	84,1	-50,9
CL_20CB	115,0	82,5	-32,5
CL_30CB	110,0	36,5	-73,5
CL_40CB	75,0	25,4	-49,6
CL_50CB	50,0	15,9	-34,1
CL_10MK	110,0	52,4	-57,6
CL_20MK	465,0	144,4	-320,6
CL_30MK	785,0	258,7	-526,3
CL_40MK	1225,0	354,0	-871,0
CL_50MK	1575,0	495,2	-1079,8
CL_10PV	90,0	82,5	-7,5
CL_20PV	140,0	90,5	-49,5
CL_30PV	90,0	61,9	-28,1
CL_40PV	175,0	73,0	-102,0
CL_50PV	90,0	23,8	-66,2

Os resultados mostram que todas as composições estudadas com cal aérea apresentam IA superior a 75% aos 28 dias, exceto a CL_50CB, demonstrando desta forma a propensão existente neste tipo de argamassas para obter resistências iniciais superiores. No entanto, apenas as argamassas constituídas por 20, 30, 40 e 50% de MK e de 20% PV são consideradas pozolânicas, respeitando os valores de referência descritos na norma.

O facto das argamassas de metacaulino apresentarem IA superiores às restantes argamassas confirma os dados obtidos para este material nos ensaios de Chapelle e Frattini, sendo estes ensaios realizados com um tempo reacional menor.

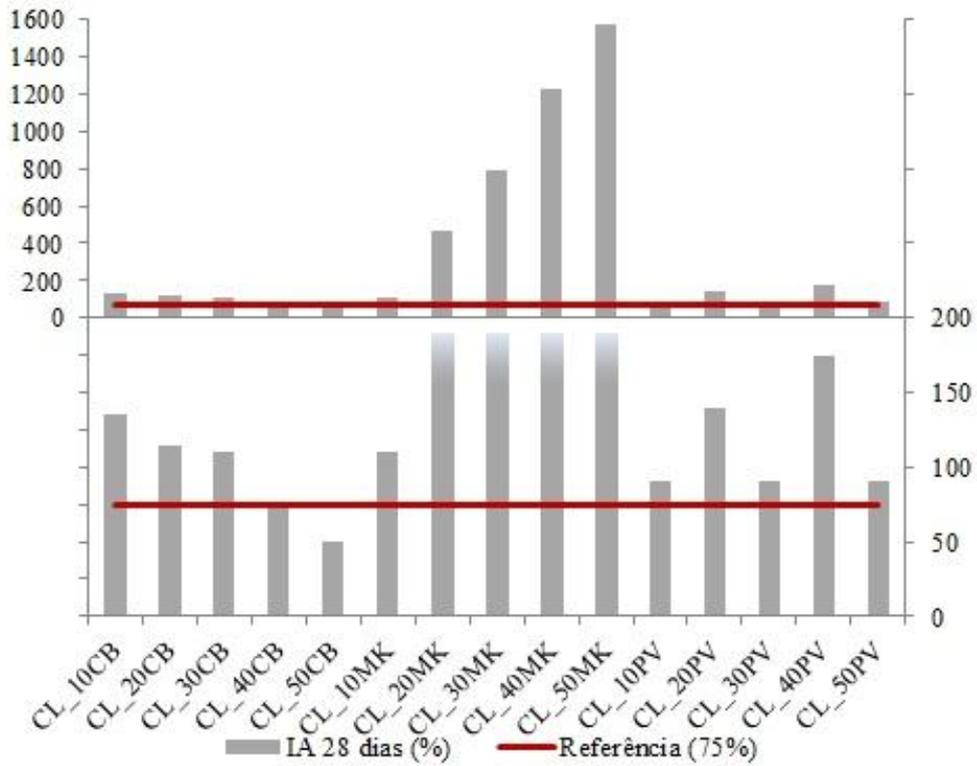


Figura 4.12 - Resultados do Índice de atividade aos 28 dias das argamassas de cal aérea com diferentes teores de pozzolana.

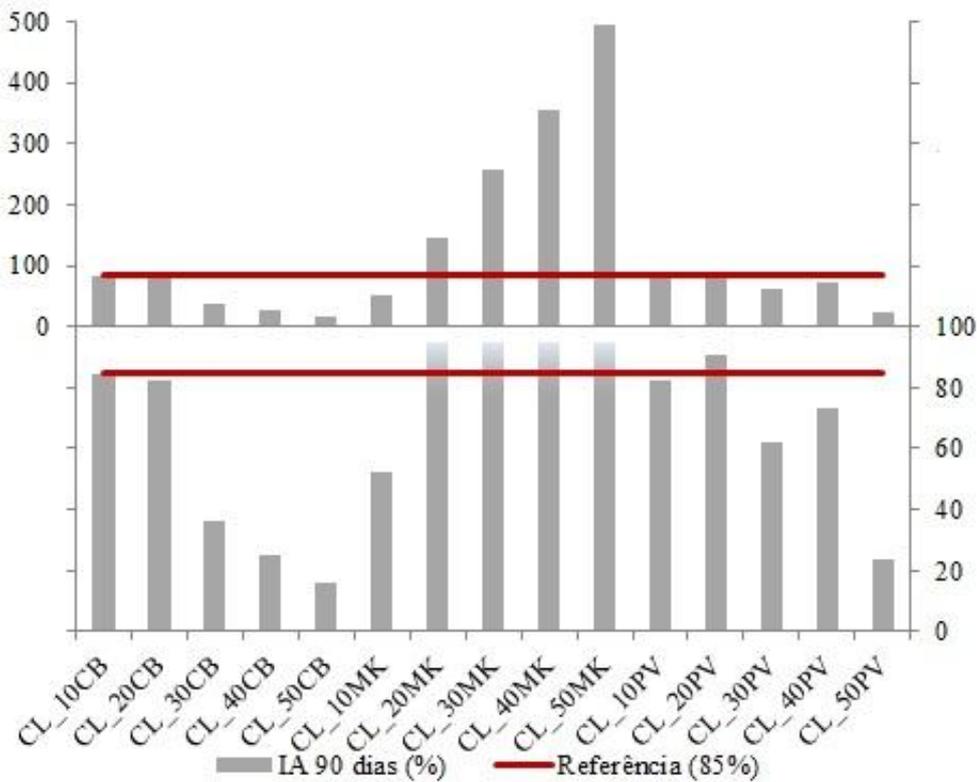


Figura 4.13 - Resultados do Índice de atividade aos 90 dias das argamassas de cal aérea com diferentes teores de pozzolana.

4.2 Resultados comparativos entre ensaios

4.2.1 Chapelle Vs Fratini

A análise dos resultados destes dois ensaios permite comparar a capacidade dos materiais em reagir com a cal e com os compostos de hidratação do cimento Portland,

No Quadro 4.8 indicam-se os valores do consumo de hidróxido de cálcio, tal como as concentrações do ião hidroxilo e de óxido de cálcio, registados no ensaio de Chapelle e no ensaio de Fratini aos 8 dias.

Quadro 4.8 – Consumo de portlandite no ensaio de Chapelle Vs concentrações do ião hidroxilo e de óxido de cálcio no ensaio de Fratini aos 8 dias.

Pozolana	Teor (%)	Consumo de Ca(OH)_2 (mg)	[OH] (mmol/l)	[CaO] (mmol/l)
MK	10	1342,2	59,7	5,9
	30		31,1	0,5
	50		2,5	0,2
PV	10	1120,3	68,5	8,5
	30		68,6	7,7
	50		64,1	5,3
CB	10	518,5	69,5	8,6
	30		67,6	5,6
	50		68,8	4,7

Analisando os dados recolhidos pelos diferentes ensaios, constata-se que o metacaulino reage fortemente com a cal, apresentando um elevado consumo de portlandite, mas também com o cimento Portland, registando concentrações muito baixas de [OH] e [CaO]. Pela comparação de valores do pó de vidro com os das cinzas de biomassa apresentados no Quadro 4.8, constata-se que estes dois materiais apresentam reações diferentes quando combinados ora com a cal aérea, ora com o cimento Portland.

Os gráficos da Figura 4.14 à Figura 4.17 expõem as relações obtidas entre os dados do ensaio de Chapelle e do ensaio de Fratini. Os gráficos estão organizados por teor de pozolana, sabendo-se que o material que apresenta menor valor no eixo das abcissas corresponde às CB, seguido do PV e o maior representa o MK.

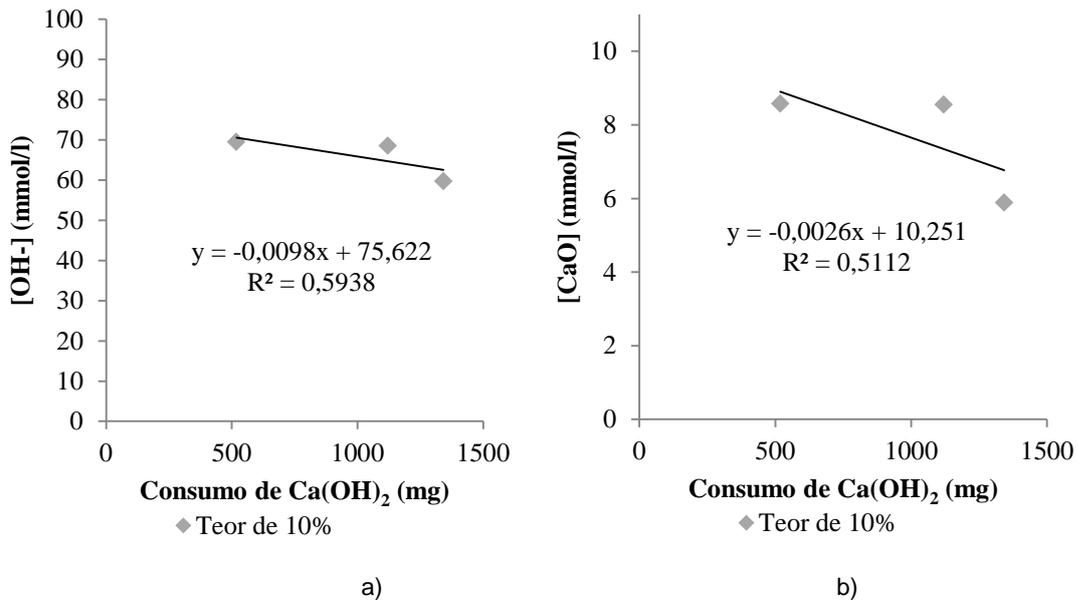


Figura 4.14 - Relação entre o consumo de portlandite no ensaio de Chapelle e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) em cimentos com 10% de teor em pozolana, aos 8 dias no ensaio de Fratini.

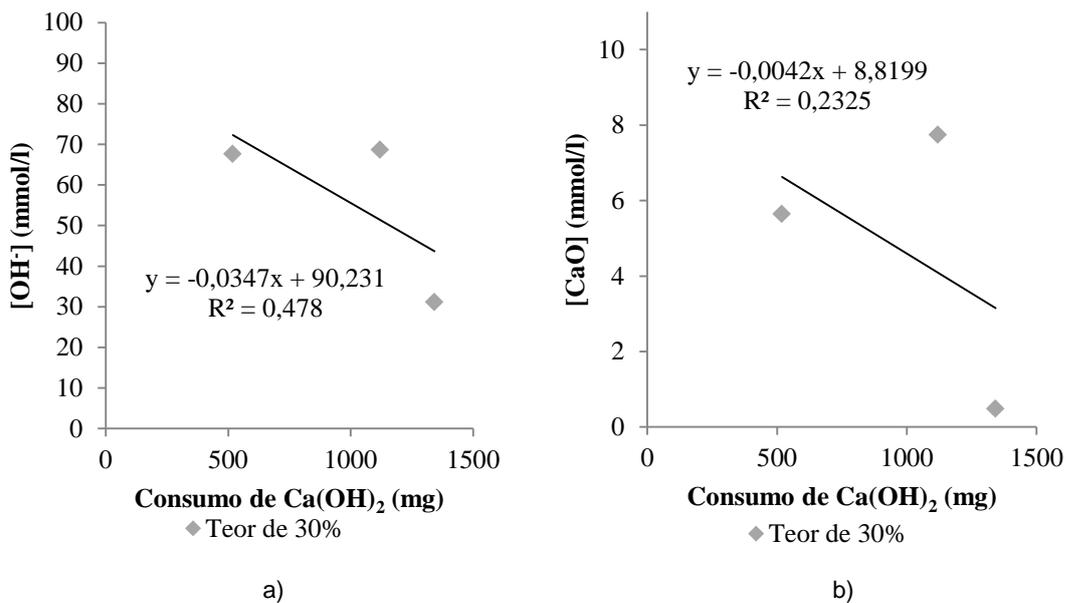


Figura 4.15 - Relação entre o consumo de portlandite no ensaio de Chapelle e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) em cimentos com 30% de teor em pozolana, aos 8 dias no ensaio de Fratini.

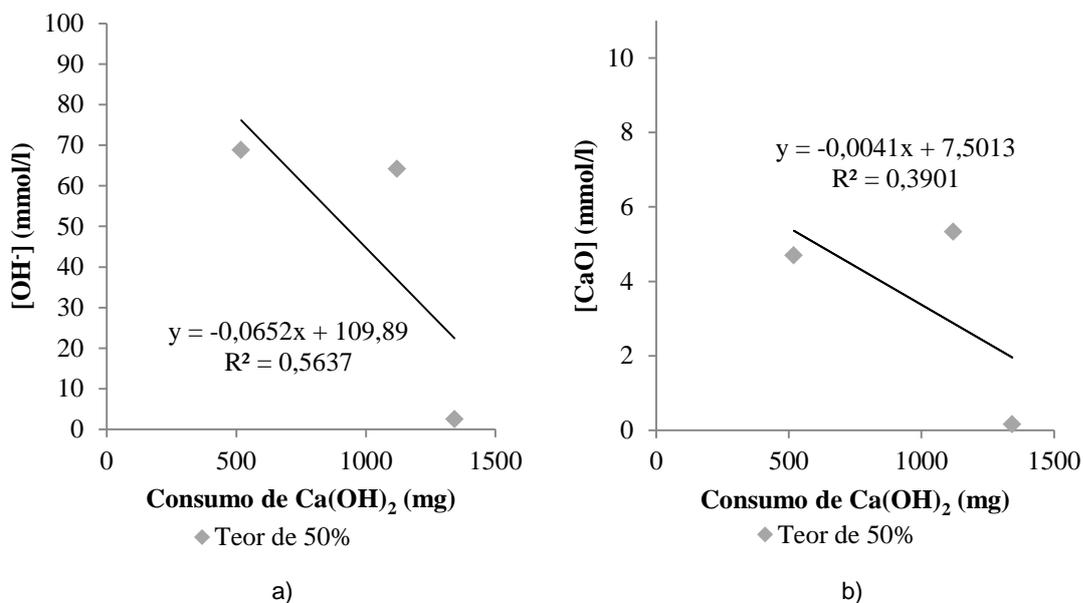


Figura 4.16 - Relação entre o consumo de portlandite no ensaio de Chapelle e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) em cimentos com 50% de teor em pozolana, aos 8 dias no ensaio de Fratini.

Analisando os gráficos obtidos, verifica-se uma concordância de resultados relativamente à alta reatividade referente ao metacaulino, tanto na reação com a cal, como com o cimento Portland. No entanto, no caso da CB e do PV os materiais apresentam reações diferentes com concentrações de [OH⁻] e de CaO não relacionáveis com os resultados obtidos no ensaio de Chapelle. Se no ensaio de Chapelle se pode concluir que o PV tem capacidade para reagir com a cal superior à das CB, para o ensaio de Fratini não é possível comparar a reatividade entre estes dois materiais desta forma.

A diferença de comportamento apresentada pelo PV e CB nos dois ensaios conjuga-se com o facto de estes ensaios se realizarem com diferentes tipos de ligante e com diferentes tempos de cura.

Na Figura 4.17 a) e b), mostra-se a relação existente entre as composições que necessitaram de maior tempo reacional (15 dias) no ensaio de Fratini, 10% de CB, 10% PV e 30% PV, com os valores de cada material no ensaio de Chapelle, lembrando que apenas o cimento com 30% de PV foi considerado pozolânico.

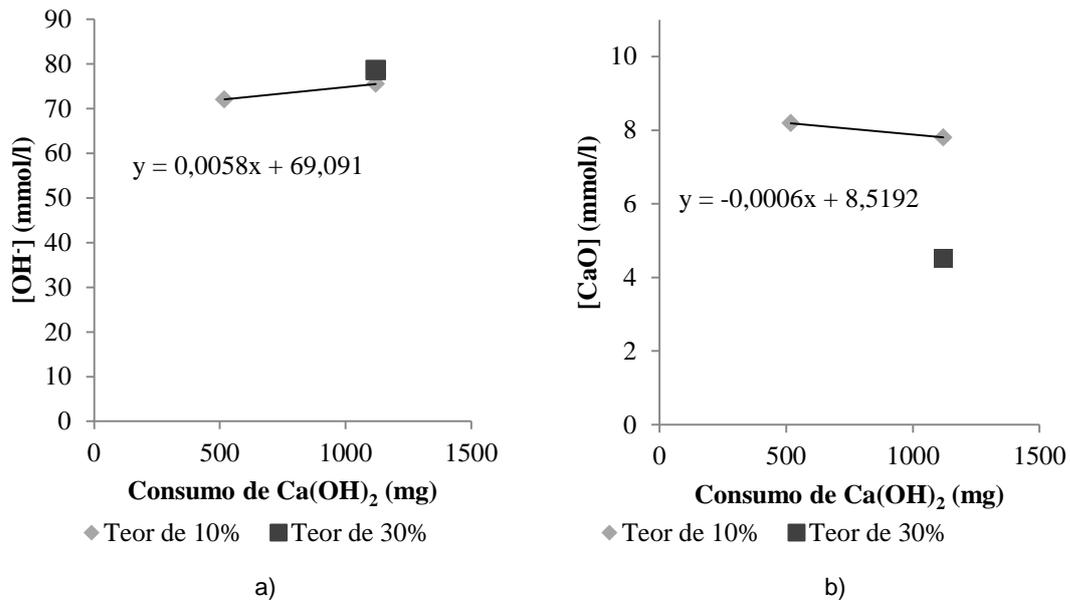


Figura 4.17 - Relação entre o consumo de portlandite no ensaio de Chapelle e a concentração do ião hidróxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 15 dias no ensaio de Fratini.

4.2.2 Chapelle Vs Índice de Atividade

A comparação entre os resultados destes dois ensaios permite comparar a reatividade que cada pozolana obteve na reação com a cal, através do consumo de portlandite, com a resistência à compressão obtida nas argamassas com diferentes teores de pozolana e traduzida pelo índice de atividade. Primeiro serão comparados os resultados das argamassas de cimento e de seguida das argamassas de cal aérea com os resultados do ensaio Chapelle.

Com base nos resultados de ambos os ensaios, representados em gráficos, obtiveram-se as Figura 4.18 e Figura 4.19.

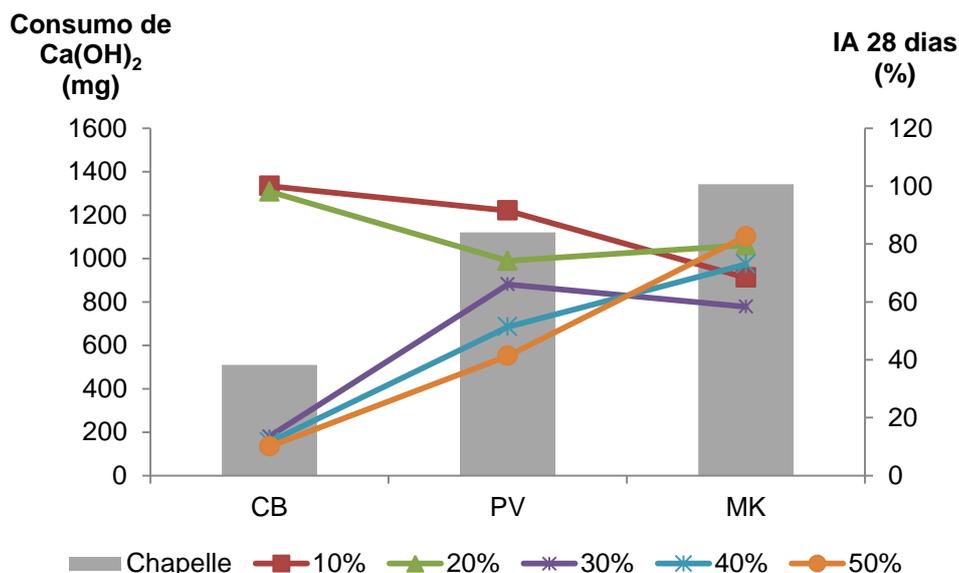


Figura 4.18 - Relação entre o consumo de cal no ensaio de Chapelle e o IA aos 28 dias das argamassas de cimento.

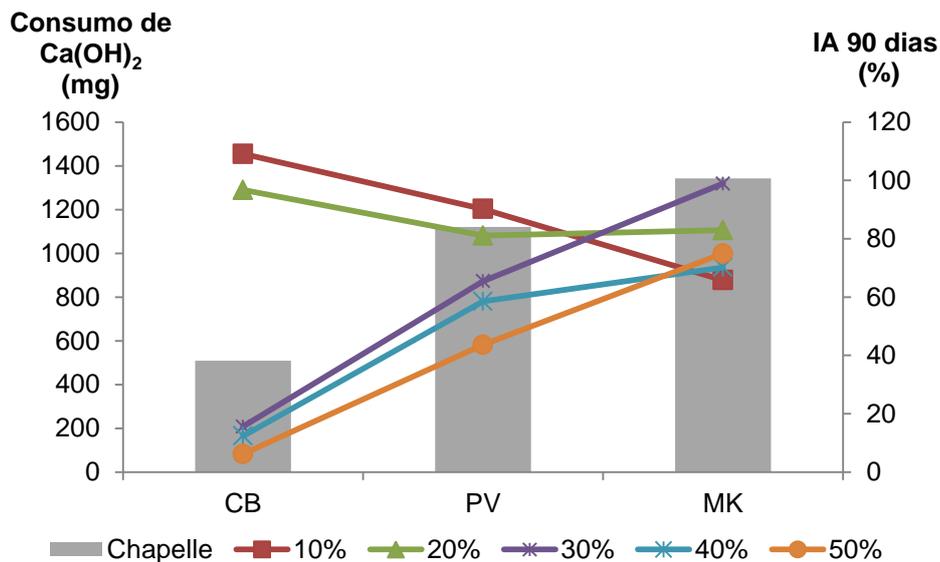


Figura 4.19 - Relação entre o consumo de cal no ensaio de Chapelle e o IA aos 90 dias das argamassas de cimento.

Analisando as Figura 4.18 e Figura 4.19 verifica-se que as composições com teores elevados de pozolana (30, 40 e 50%) apresentam IA relacionados com os resultados de Chapelle, mostrando que quanto maior for o teor de pozolana utilizada no ensaio de IA, maior é a correlação com o ensaio de Chapelle, tanto aos 28 como aos 90 dias. Como a reatividade das CB ou do PV não é muito elevada, constata-se que, para baixos teores de substituição (10 e 20%), não existe uma relação direta entre os ensaios, porque aqueles estes materiais atuam mais como “filler” do que como pozolana.

Os gráficos das Figura 4.20 e Figura 4.21, mostram as relações obtidas entre os dados do ensaio de Chapelle e do IA aos 28 dias e 90 dias para as argamassas de cal aérea.

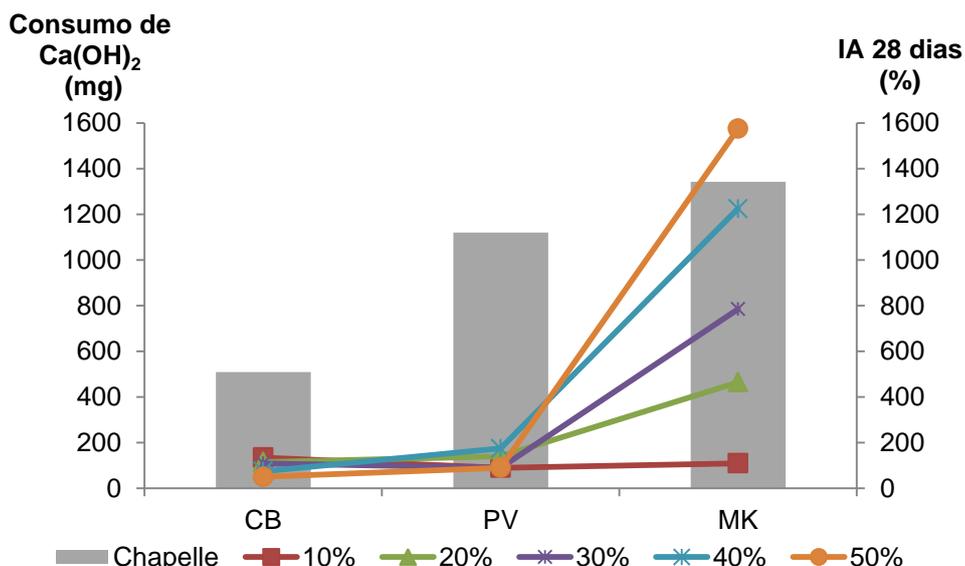


Figura 4.20 - Relação entre o consumo de cal no ensaio de Chapelle e o IA aos 28 dias das argamassas de cal aérea.

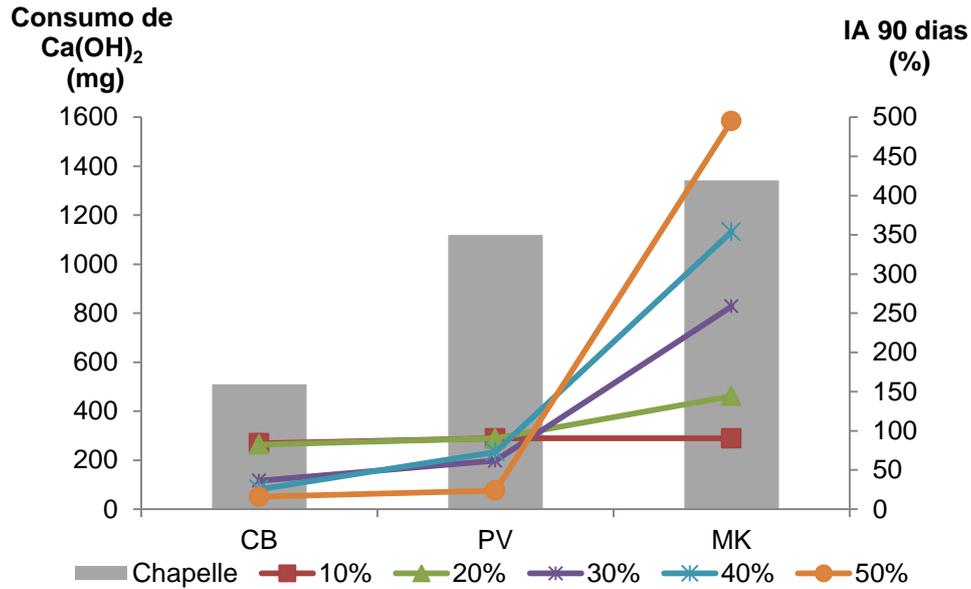


Figura 4.21 - Relação entre o consumo de cal no ensaio de Chapelle e o IA aos 90 dias das argamassas de cal aérea.

Verifica-se que existe uma boa correlação entre estes dois ensaios para as argamassas constituídas por cal aérea, para ambas as idades do IA, apesar do ensaio de Chapelle utilizar um tempo reacional mais curto (16 horas). Constatou-se que os materiais que consumiram mais portlandite foram também os que apresentaram maiores valores de IA, variando a proporcionalidade dos resultados com o teor de cada pozolana utilizada.

4.2.3 Frattini Vs Índice de Atividade

Considerando a existência de quatro tempos de cura diferentes para estes dois ensaios, analisaram-se os resultados do IA aos 28 dias comparativamente com as concentrações de OH^- e de CaO aos 8 e 15 dias, independentemente de o resultado ser pozolânico ou não.

Da Figura 4.22 à Figura 4.25 serão apresentados os gráficos de comparação entre o ensaio Frattini e o IA por tipo de pozolana, para as argamassas de cimento Portland.

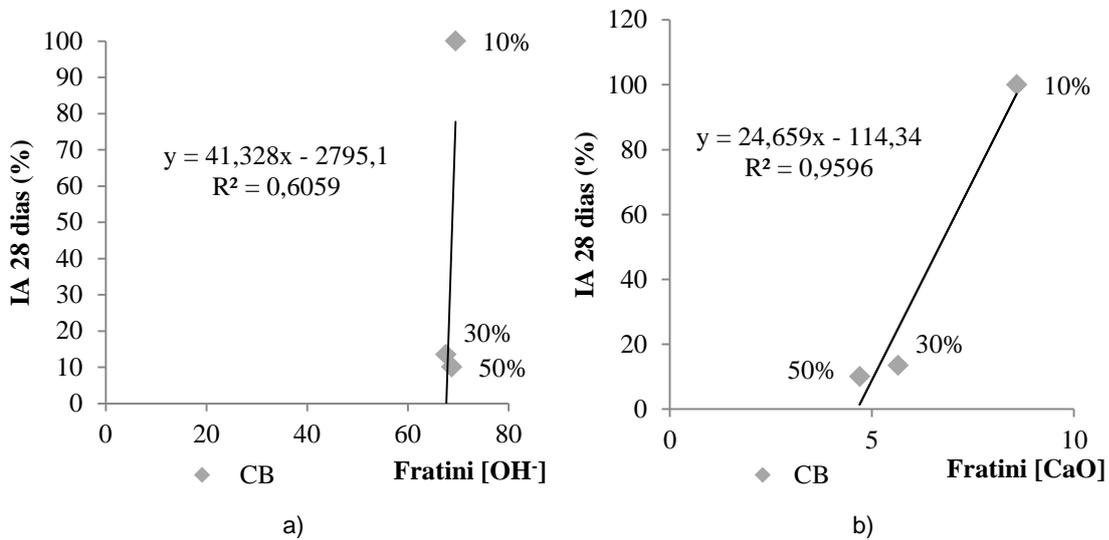


Figura 4.22 – Relação para as cinzas de biomassa entre o consumo de Portlandite no ensaio de IA de argamassas de cimento e a concentração do íon hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 8 dias no ensaio de Fratini.

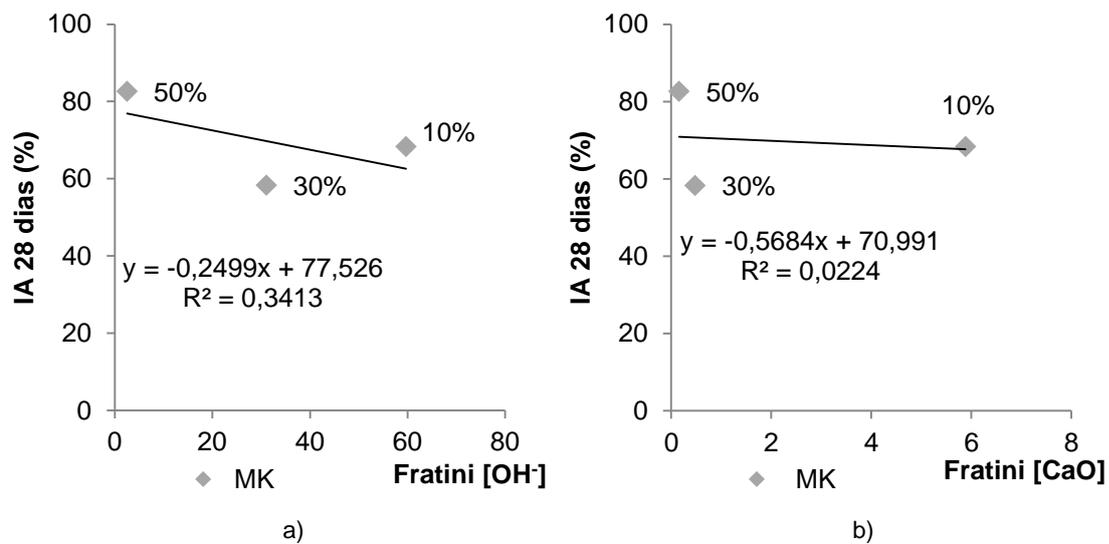


Figura 4.23 – Relação para o metacaulino entre o consumo de portlandite no ensaio de IA de argamassas de cimento e a concentração do íon hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 8 dias no ensaio de Fratini.

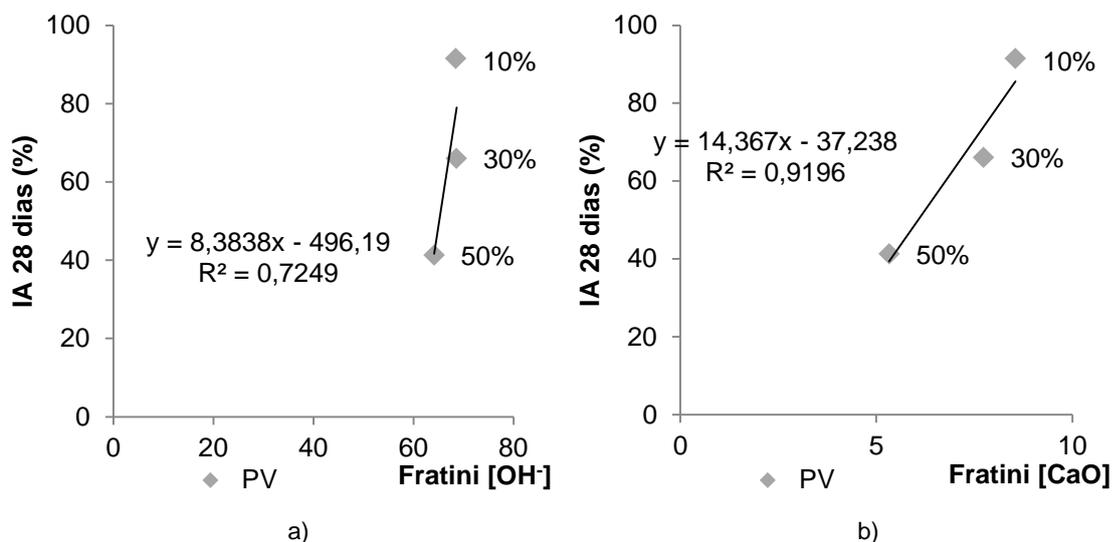


Figura 4.24 – Relação para o pó de vidro entre o consumo de portlandite no ensaio de IA de argamassas de cimento e a concentração do íão hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 8 dias no ensaio de Fratini.

Observando as figuras 4.22 à 4.24, que permitem comparar os resultados entre estes dois ensaios, verifica-se que a relação entre o IA aos 28 dias e as concentrações de OH⁻ e CaO varia consoante o material estudado. Constata-se que o PV e as CB apresentam uma relação semelhante entre estes dois fatores; no entanto essa relação é distinta quando comparada com os gráficos do metacaulino, não sendo possível concluir nenhum tipo de correlação entre estes dois ensaios.

Como foi referido anteriormente no ensaio de Fratini, aos 15 dias apenas foram ensaiadas as composições caracterizadas como não pozolânicas aos 8 dias; desta forma não foi possível a comparação entre as concentrações de CaO e OH⁻ para todas as composições estudadas neste período de tempo, tal como se sucederá na comparação entre estes ensaios nas argamassas de cal aérea.

Os gráficos da figura 4.25 comparam as concentrações OH⁻ e CaO determinadas pelo ensaio de Fratini aos 15 dias com o IA aos 28 dias em argamassas de cimento Portland misturadas com pó de vidro e cinzas de biomassa.

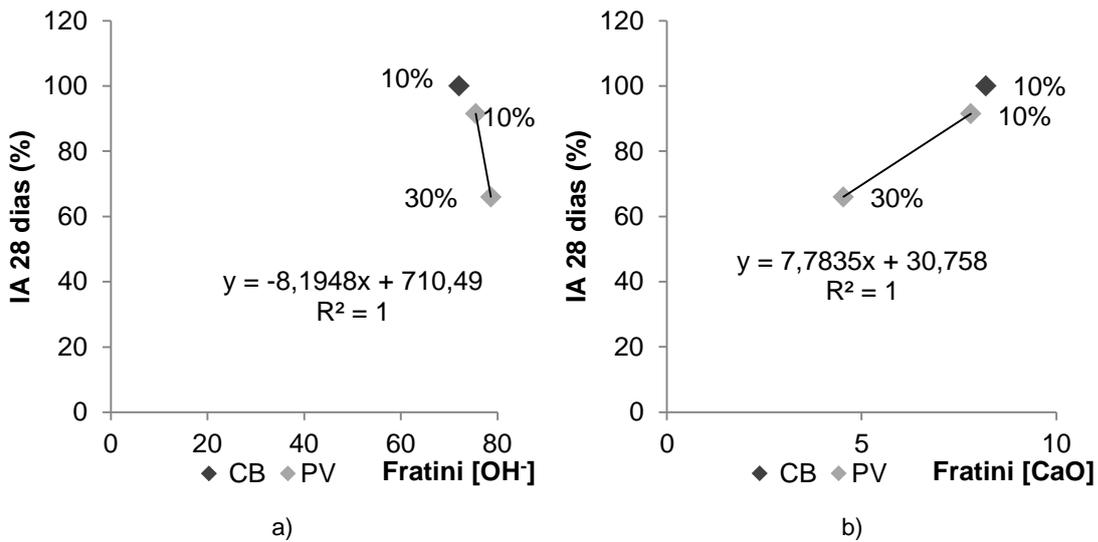


Figura 4.25 – Relação para as cinzas de biomassa e pó de vidro entre o consumo de portlandite no ensaio de IA de argamassas de cimento e a concentração do íon hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 15 dias no ensaio de Fratini.

Os resultados do ensaio de Fratini foram comparados com o IA das argamassas de cal aérea utilizando os mesmos termos de comparação e são apresentados nas Figura 4.26 até à Figura 4.29.

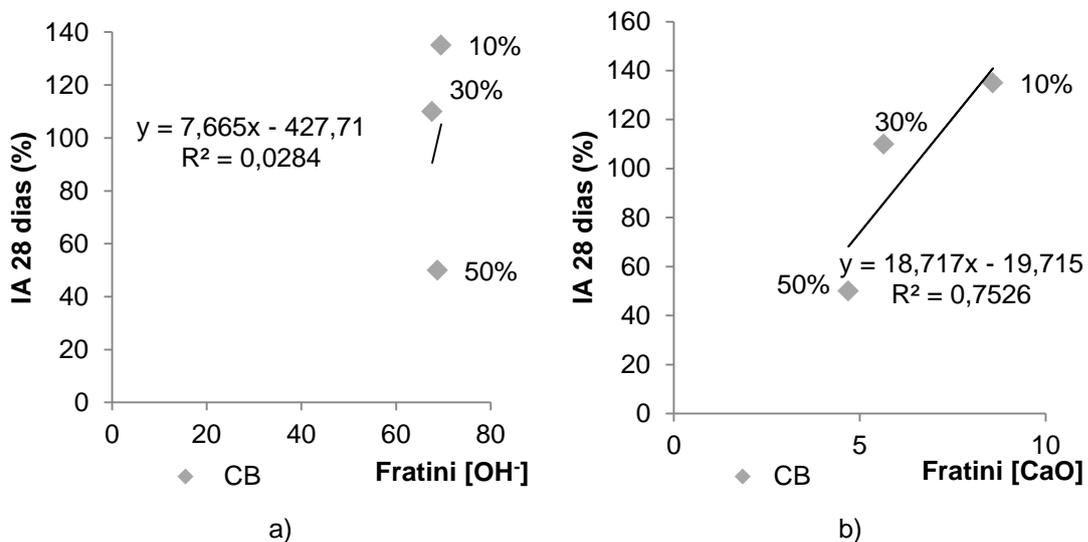


Figura 4.26 – Relação para as cinzas de biomassa entre o consumo de portlandite no ensaio de IA de argamassas de cal aérea e a concentração do íon hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 8 dias no ensaio de Fratini.

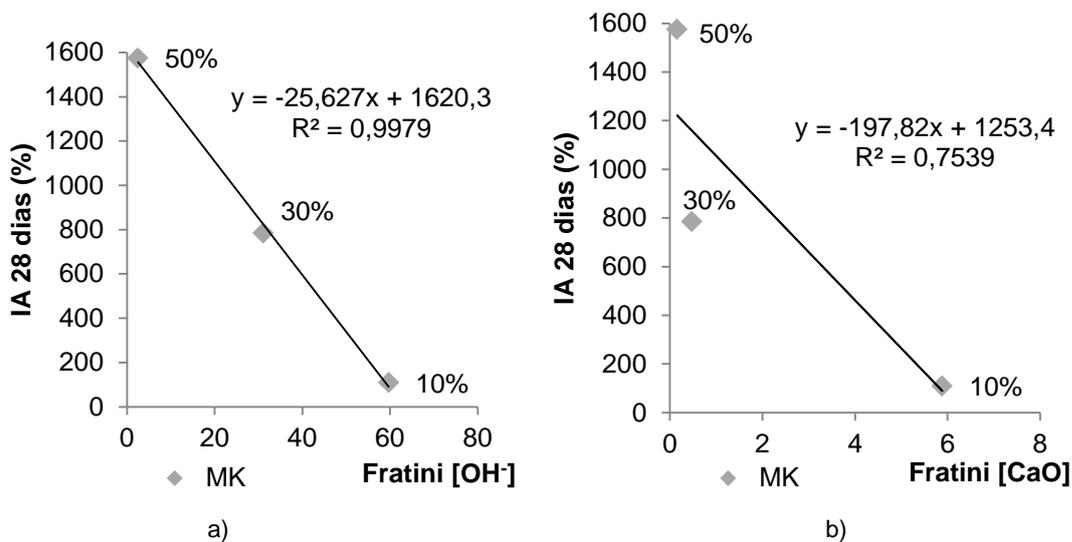


Figura 4.27- Relação para o metacaulino entre o consumo de portlandite no ensaio de IA (argamassas de cal aérea) e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 8 dias no ensaio de Fratini.

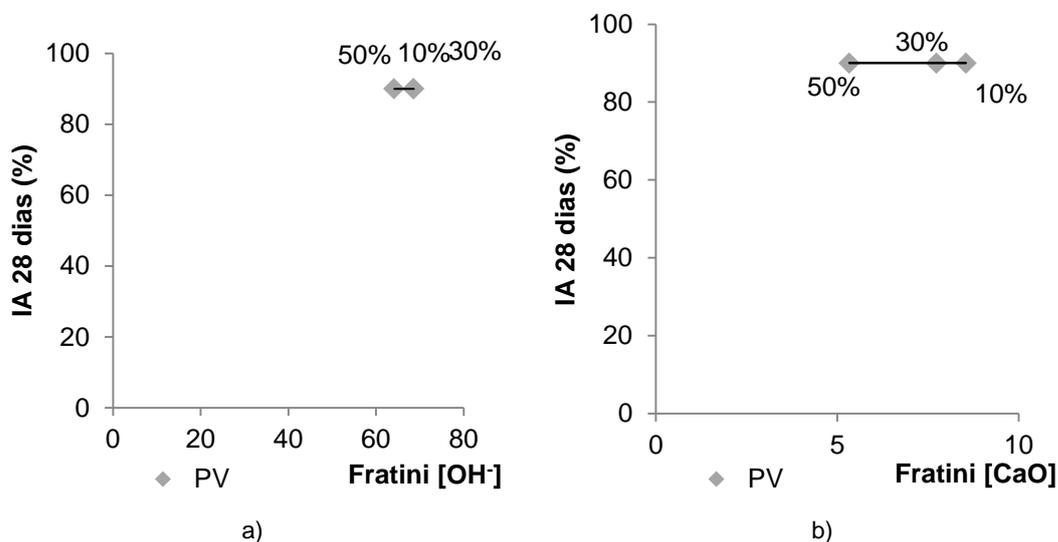


Figura 4.28- Relação para o pó de vidro entre o consumo de portlandite no ensaio de IA (argamassas de cal aérea) e a concentração do ião hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 8 dias no ensaio de Fratini.

Avaliando os gráficos obtidos, verifica-se que os materiais estudados apresentam resultados completamente distintos, não traduzindo qualquer tipo de correlação entre as concentrações de CaO e OH⁻ com o índice de atividade aos 28 dias para argamassas de cal aérea.

A falta de correlação entre esses dois ensaios deve-se ao facto do ensaio de Fratini servir para medir a reatividade entre a pozolana e o cimento Portland, e neste caso é efetuada a comparação com o IA das argamassas com ligante cal aérea. Conclui-se assim que os materiais têm reatividades diferentes conforme o tipo de ligante que é empregue nessa avaliação.

Relativamente aos ensaios de Fratini realizados aos 15 dias, quando comparados com os ensaios de IA aos 28 dias respetivos às argamassas de cal aérea, obtiveram-se os gráficos apresentados na Figura 4.29 a) e b).

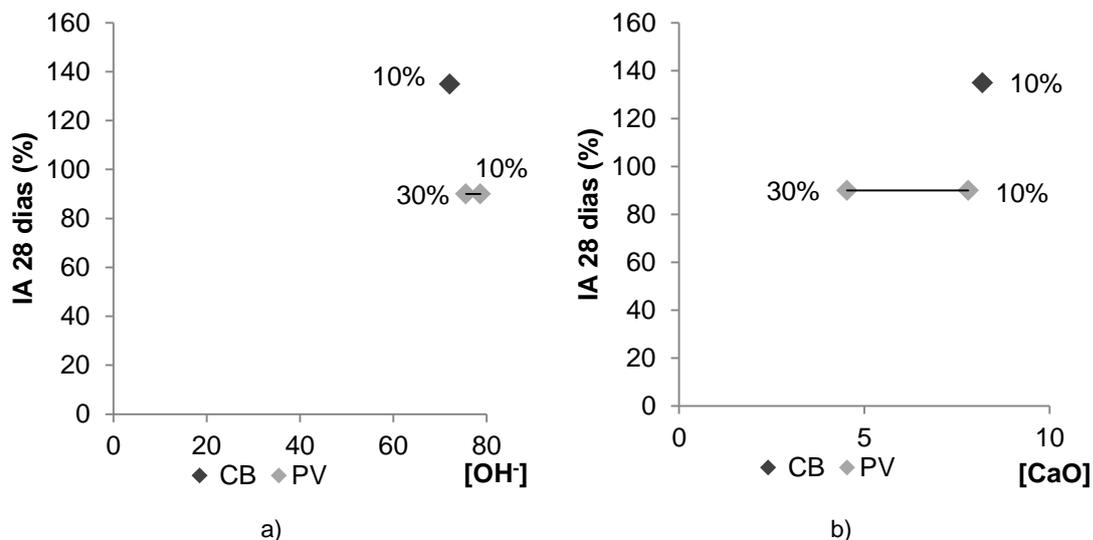


Figura 4.29 – Relação para as cinzas de biomassa e o pó de vidro entre o consumo de portlandite no ensaio de IA de argamassas de cal aérea e a concentração do íon hidroxilo (a) e de óxido de cálcio (b) aos 15 dias no ensaio de Fratini.

4.3 Avaliação da reatividade pozolânica dos materiais analisados

De acordo com os resultados obtidos para cada pozolana, verificou-se que os materiais têm comportamentos diferentes quando colocados a reagir com diferentes tipos de ligantes e em diferentes condições de cura. Nos quadros 4.9 a 4.11 serão apresentados os materiais analisados (as pozolanas), misturas de ligante e pozolana e argamassas, e respectiva avaliação da reatividade pozolânica, segundo as normas respectivas a cada ensaio.

Quadro 4.9 – Classificação da reatividade dos materiais, segundo o ensaio Chapelle.

Material	Ensaio Chapelle
CB	NP
PV	P
MK	P

NP – não pozolânica; P - pozolânica

Quadro 4.10 – Classificação das misturas de cimento e pozolana, segundo o ensaio Fratini.

Ensaio Fratini		
Composições	8 dias	15 dias
10%CB	NP	NP
30%CB	P	-
50%CB	P	-
10%PV	NP	NP
30%PV	NP	P
50%PV	P	-
10%MK	P	-
30%MK	P	-
50%MK	P	-

NP – não pozolânica; P - pozolânica

Quadro 4.11 – Argamassas classificadas como pozolânicas, segundo o índice de atividade.

Índice de Atividade Argamassas Pozolânicas			
Ligante: Cal Aérea		Ligante: Cimento Portland	
28 dias	90 dias	28 dias	90 dias
10%CB	-	10%CB	10%CB
20%CB		20%CB	20%CB
30%CB			
40%CB			
10%PV	20%PV	10%PV	10%PV
20%PV			
30%PV			
40%PV			
50%PV			
10%MK	-	20%MK	30%MK
20%MK	20%MK		
30%MK	30%MK		
40%MK	40%MK		
50%MK	50%MK		

O metacaulino foi o material que demonstrou maior capacidade para reagir tanto com a cal (ensaio de Chapelle) como com o cimento (ensaio de Fratini); no entanto os mesmos resultados não se traduziram em termos de resistência mecânica para as argamassas de cimento. Das composições estudadas apenas as CP_20MK e CP_50MK, demonstraram ser pozolânicas aos 28 dias, e a CP_30MK demonstrou ser aos 90 dias. As argamassas de cal aérea corresponderam ao resultado obtido no ensaio de Chapelle, sendo consideradas pozolânicas as argamassas com metacaulino entre 20% e 50%, tanto aos 28 como aos 90 dias.

A cinza de biomassa foi a pozolana estudada que provou reagir em menor quantidade com a cal aérea (ensaio de Chapelle); apesar disso as suas argamassas mostraram ser pozolânicas aos 28 dias para composições com CB entre 10% e 40%; no entanto o mesmo não se estendeu para as resistências obtidas aos 90 dias. Relativamente à combinação deste tipo de pozolana com o cimento Portland, o resultado do ensaio de Fratini considerou as misturas com 30% e 50% pozolânicas. Os resultados do IA, tanto aos 28 dias, como aos 90 dias, revelam uma boa capacidade de reação para as misturas de cimento com 10% e 20 % desta pozolana, sendo caracterizadas como pozolânica para ambas as idades. Contrariamente aos resultados obtidos no ensaio de Fratini, as CB demonstraram ser, de todas as pozolanas estudadas, aquelas em que os produtos da reatividade pozolânica originam, em combinação com o cimento Portland, compostos que se traduziram em maiores resistências mecânicas.

O pó de vidro demonstrou ser um material que reage de uma forma semelhante com ambos os ligantes utilizados neste estudo. No ensaio de Chapelle registou um consumo de portlandite suficiente para ser considerado como pozolânico. Relativamente à reatividade com o cimento Portland, o PV demonstrou ser o material em estudo que menos reagiu com esse tipo de ligante, sendo a única pozolana a necessitar de 15 dias a reagir para a sua mistura com 30% ser considerada pozolânica. As argamassas de cimento Portland com 10% de PV e de cal aérea com 20% PV apresentaram IA aos 28 e 90 dias superior aos valores de referência mencionados na norma NP EN 450-1 [IPQ, 2012], sendo classificadas como argamassas pozolânicas.

5. CONCLUSÃO

5.1 Considerações Finais

O estudo desenvolvido, que se insere no âmbito do projeto FCT METACAL, consistiu em avaliar a influência da adição de diferentes teores de distintas pozolanas artificiais, substituindo parcialmente o ligante, em argamassas de cal aérea e de cimento Portland, classificando-as através do índice de atividade, assim como avaliar a reatividade existente entre as pozolanas utilizadas e os respectivos ligantes, utilizando os ensaios de Chapelle e de Fratini, respectivamente.

De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que o ensaio de Chapelle, que mede a quantidade de cal consumida por grama de pozolana, oferece uma boa indicação da relação entre resistências mecânicas das argamassas de cal aérea com diferentes pozolanas, não diferenciando teores.

O ensaio de Fratini permite estudar a pozolanicidade de cimentos com diferentes teores de pozolana. No entanto, as misturas de cimento com diferentes teores de pozolana, ensaiadas pelo método de Fratini, não mostraram qualquer tipo de correlação com os valores do índice de atividade para essas mesmas misturas, utilizadas nas argamassas de cimento Portland. Neste ensaio constatou-se que, quanto maior for o teor de pozolana misturada no cimento estudado, menores serão as concentrações dos íons $[OH^-]$ e $[CaO]$, devido à reação pozolânica existente entre o cimento e a pozolana.

O índice de atividade permitiu comparar a resistência mecânica das argamassas de cal aérea e de cimento Portland com os ensaios de Chapelle e Fratini. Este é um ensaio que avalia a reatividade pozolânica através de resistências mecânicas de argamassas realizadas com pozolanas em substituição parcial do ligante. Apesar de ter sido projetado para cinzas volantes misturadas com cimento Portland, mostrou ser viável a sua utilização para outros tipos de materiais e ligantes, permitindo o estudo de argamassas com diferentes teores.

Relativamente aos materiais estudados, verificou-se que o metacaulino foi a pozolana que apresentou maior capacidade para reagir através dos ensaios químicos, tanto com a cal como com o cimento. Em termos de índice de atividade apenas foi comprovada a alta reatividade com a cal aérea, sendo consideradas pozolânicas as composições com teores entre os 20% e 50%, inclusive.

As cinzas de biomassa mostraram pouca capacidade para reagir com a cal, resultado este comprovado pelo índice de atividade das suas argamassas, que não atingiram os valores de referência necessários para serem considerados como pozolânicas. Quando misturadas com cimento, as cinzas revelaram não ser pozolânicas no ensaio de Fratini para a composição de 10%; contudo no ensaio de índice de atividade as argamassas com 10% e 20% de cinzas revelaram ser pozolânicas.

O pó de vidro demonstrou um comportamento semelhante para ambos os ligantes, sendo consideradas pozolânicas as argamassas de cal com substituição de 20% e as argamassas de cimento com teor igual a 10%.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

Com o objetivo de aprofundar e desenvolver alguns aspetos relacionados com este estudo, considera-se interessante o desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

- Estudar a evolução das características das argamassas e betões utilizados neste estudo a idades mais avançadas (180 dias) e comparar os resultados com os ensaios físicos e de durabilidade (por exemplo, absorção de água por capilaridade, secagem e resistência aos sulfatos).
- Estudar a otimização do teor de pozolana e quantidade de água das argamassas em que parte do ligante é substituído por pozolana, tal como a influência das condições de cura.
- Estudar as características das argamassas de cimento fabricados, ensaiando mecanicamente a idades mais jovens (1, 3 e 7 dias), permitindo verificar se os comportamentos são correlacionáveis com algum ensaio de reatividade pozolânica.
- Relacionar os ensaios de pozolanicidade com os ensaios de durabilidade de argamassas/betões.

6. BIBLIOGRAFIA

- AFNOR (2012), *Métakaolin, addition pouzzolanique pour bétons – Addition pour béton hydraulique – Métakaolin – Spécifications et critères de conformité.*
- AHMARUZZAMAN, M.- (2010), *A review on the utilization of fly ash.* Progress in Energy and Combustion Science, 36, 327-363.
- ALMEIDA, N. et al.- (2007), *Argamassas com base em cal aérea e cinzas de casca de arroz para conservação do património construído,* APFAC, Lisboa.
- ALMEIDA, N. et al.- (2010), *Argamassas de cal aérea e cinza de casca de arroz. Influência da finura da cinza na reactividade pozolânica.* 3º Congresso Nacional de Argamassas, APFAC, Lisboa.
- ASTM – (2007), *C 618-12 Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.* ASTM international.
- BANDEIRA, A.- (2012), *Caracterização de argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com metacaulino. Evolução com a idade.* Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Construção. FCT – UNL, Lisboa.
- BAUER, E. et al.- (2005), *Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades.* SindusCon-SP, Brasília, 20-23.
- BOTELHO, P.- (2003), *Argamassas tradicionais em suportes de alvenaria antiga: Comportamento em termos de aderência e durabilidade.* Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Construção. IST – UTL, Lisboa.
- BRAGA, A. et al. (2007), *Descrições estruturais cristalinas de Zeólitos.* Química Nova, 30, 1, 178-188.
- CALDARONE, M. et al.- (1994), *High-reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture.* Concrete International.16, 37–40.
- CALLEJAS, J.- (1958), *Las pozolanas.* Imprensa Saez, Madrid.
- CHAPELLE, J. (1958) *Attaque sulfo-calcique des laitiers et des pouzzolanes.* Révue des Matériaux de Construction et des Travaux Publics – edition c. Centre d'études et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques, 511, 136- 151.
- CEN (1998), EN 1015-2. *Methods of test for mortar for masonry – Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars.*
- CEN (2005), EN 1015-11. *Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.*
- CEN (2005), NP EN 196-1. *Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength.*
- CEN (2011), NP EN 196-5. *Methods of testing cement – Part 5: Pozzolanicity test for pozzolanic cement*
- CHEAH, C. et al.- (2011), *The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview.* Resources, conservation and recycling, 55, 669-685.
- CHEAH, C. et al.- (2012), *Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement.* Construction and Building Materials, 30, 320–329.

CHEN G. *et al.*- (2002), *Glass recycling in cement production-an innovative approach*. Waste Management, 22, 747-753.

COELHO, A. *et al.*- (2007), *Betão com incorporação de elevadas percentagens de cinza volante*. Lisboa. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil. IST- UTL, Lisboa.

COELHO, A. *et al.*- (2009), *A cal na Construção*. Edição Tecminho, Guimarães.

CORDEIRO, G. *et al.*- (2009), *Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete*. Materials and Structures, 42, 983-992.

CORINALDESI, G. *et al.*- (2005), *Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars*. Waste Management, 25, 197-201.

DONATELLO, S. *et al.*- (2010), *Comparison of test methods to assess pozzolanic activity*. Cement and Concrete Composites. Elsevier, 32, 121-127.

ESTRELA, S. (2008), *Argamassas tradicionais de revestimento de paredes: Fendilhação e sua reparação*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Construção. IST/UTL, Lisboa.

FARIA, J. *et al.*- (2011), *Desenvolvimento de argamassas para a reabilitação de edifícios antigos*. Parte 1 – Trabalhabilidade e comportamento mecânico. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães.

FARIA, P. *et al.*- (2012), *Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural*. Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas de Antigas de Alvenaria, 31-40, UNL, Lisboa.

FARIA-RODRIGUES, M.- (2004), *Argamassas de revestimentos para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil na especialidade de Reabilitação do Património Edificado. FCT/UNL, Lisboa.

FERRAZ, E. *et al.*- (2012), *Utilização do ensaio de Chapelle modificado para avaliação da reatividade pozolânica de metacaulinos*, APFAC, Lisboa.

FAUSTINO, G. (2010), *Síntese de zeólitos e sua peletização*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química. UA, Aveiro.

FRAGATA, A. *et al.*- (2008), *Use of glass residues in air lime mortars*. International Conference: World Heritage and Sustainable Development – Heritage, Vila Nova de Foz Côa.

FREITAS, V. *et al.*- (2008), *Specification and time required for the applications of a lime-based render inside historic buildings*. International Conference HMC 08 – Historical Mortars Conference: Characterization, Diagnosis, Repair and Compatibility, LNEC, Lisboa.

GONÇALVES, T.- (2007), *Salt crystallization in plastered or rendered walls*. Tese de Doutoramento IST, Lisboa.

GRAY, R., *et al.*- (2003), *The potential use of natural pozzolans in britishcolumbia as supplementary cementitious materials*. Prepared for The EcoSmart, CMP Technologies LTD.

IPQ – (2002), *NP EN 1097-3. Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios*. Lisboa.

IPQ - (2005), *NP EN 13139. Agregados para argamassas*. Lisboa.

IPQ - (2010), *NP 4220. Pozolanas para betão, argamassas e caldas. Definições, requisitos e verificação da conformidade*. Lisboa

IPQ - (2011), *NP EN 459-1. Cal de construção – Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. Lisboa.

IPQ - (2012), *NP EN 197-1. Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. Lisboa.

IPQ – (2012), *NP EN 450-1. Cinzas volantes para betão – Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade*. Lisboa.

JALALI, S. (1991), *A study of factors affecting the mechanical behaviour of lime fly-ash mixtures*. Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of the Council for National Academic Awards for the degree of Ph.D. Coventry Polytechnic, Coventry.

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

KASEMSUKNIMIT, A.- [2012], *Comparison of different methods for determination of pozzolanic activity* MAT-54 Annual Concrete Conference 6 MAT-54, 291–295.

LAGIER F, et al.- (2007), *Influence of Portland cement composition on early age reactions with metakaolin*, *Cement and Concrete Research*, 37, 1411–1417.

LANCASTER, L.- (2005), *Concrete Vaulted Construction in Imperial Rome*. Cambridge University Press, Cambridge.

LEA, F.- (1970), *The chemistry of cements and concrete*, Edward Arnold Publishers, Ltd, Glasgow, GB.

LOO, S. et al.- (2008), *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Quicksilver Drive, Sterling, USA

MALHOTRA, V. et al.- (1996), *Pozzolanic and cementitious materials*. *Advance in concrete technology*, New York: Gordon and Breach Publishers. 1, 4, 5-39.

MARGALHA, M. et al.- (2007), *Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea*. APFAC, Lisboa.

MARTINEZ, M. et al.- (2007), *Ancient building requirements and the evaluation of different lime-cement mortars compositions*. 2º Congresso Nacional de Argamassas, Lisboa.

MARTINS, A. (2008), *Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco*. Dissertação para obtenção de mestrado em engenharia civil. IST – UTL, Lisboa.

MASIÁ, A. et al.- (2007), *Characterising ash of biomass and waste*. *Fuel Processing Technology*, 88, 1071–1081.

MASSAZZA, F.- (1976), *Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements*, *Il Cemento*, 3-38.

MASSAZZA, F.- (1993), *Pozzolanic cements. Cement and Concrete composites*. Elsevier, 15, 185-214.

MASSAZZA, F.- (2007) *Pozzolana and pozzolanic cements*. Hewlett PC, *Lea's chemistry of cement and concrete*. Elsevier, 4, 471–602.

MEHTA K.- (1987), *Natural Pozzolans, Supplementary Cementing Materials for Concrete*, CANMET-SP-86-8e, Canadian Government Publishing Center, Supply and Services, Ottawa, 1, 1-33.

MEHTA, P.- (1999), *Concrete technology for sustainable development*. *Concrete International* 21, 47-53.

MELO, K. et al.- (2010), *Effect of metakaolin's finesses and content in self-consolidating concrete*, *Construction and Building Materials*, 24, 1529-1535.

MEYER, C et al.- (2001), *Concrete with waste glass as aggregate*, In: Recycling and Reuse of Glass Cullet, Proceedings of the International Symposium. Concrete technology unit of ASCE and University of Dendee.

MOROPOULOU, A. et al.- (2004), *Accelerated microstructural evolution of a calcium-silicate-hydrate (C-S-H) phase in pozzolanic pastes using fine siliceous sources: comparison with historic pozzolanic mortar*. Cement and Concrete Research, 34, 1-6.

OLIVEIRA, L. et al.- (2012), *The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components*. Construction and Building Materials, 31, 197–203.

ORTIZ S.- (1996), *O vidro e as embalagens de vidro*. CETEA/ITAL, Campinas, Brasil.

PAIVA, H. et al.- (2012) *Effect of metakaolin dispersion on the fresh and hardened state properties of concrete*, Cement and Concrete Research, 42, 607-612.

PELS, J. et al.- (2005), *Utilization of ashes from biomass combustion and gasification*, 14th European Conference Exhibition, Paris.

PONTES, J.- (2011), *Reatividade de pozolanas para argamassas e betões*. Dissertação para obtenção de grau de mestre em engenharia civil. FCT-UNL, Lisboa

POUEY, M.- (2006), *Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico*. Dissertação para a obtenção de doutoramento na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

RAJAMMA, R.– (2011), *Incorporação de cinzas volantes de biomassa em materiais cimentícios*. Tese de doutoramento em ciência e engenharia de materiais. UA, Aveiro.

SABIR, B. et al.- (2001), *Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review*. Cement and Concrete Composites, 23, 441-454.

SAID-MANSOUR, M. et al.- (2011), *Influence of calcined kaolin on mortar properties*. Construction and Building Materials, 25, 5, 2275–2282.

SHAYAN A, XU A. (2004), *Value-added utilization of waste glass in concrete*. Cement Concrete Research, 34, 81–9.

SHI, C. et al- (2007), *A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete*. Resources, Conservation and Recycling, 52, 234–247.

SHI, C. et al.- (2000), *Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators – Part I. Reaction kinetics*, Cement and Concrete Research, 30, 91-98.

SHI, C. et al.- (2005), *Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders*. Cement and Concrete Research, 35, 5, 987–993.

SIDDIQUE, R.,KLAUS, J. (2008), *Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review*. Elsevier, Applied Clay Science, 43, 392-400.

SILVA, A.- (2005), *Degradação do betão por reações álcalis-sílica. Utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua prevenção*. Tese de doutoramento em Engenharia Civil. Universidade do Minho, Guimarães.

SILVA, B.- (2007), *Betão leve estrutural com agregados de argila expandida*, Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

SINGH, S. *et al.*- (2011), *A comparative evaluation of minerals and trace elements in the ashes from lignite, coal refuse, and biomass fired power plants*. International Journal of coal Geology, 87, 112-120.

SOUSA-COUTINHO, A.- (1958), *Pozolanas, betões com pozolanas e cimentos pozolânicos*, Memória 136, Lisboa., LNEC.

SOUSA-COUTINHO, A.- (1988), *Fabrico e propriedades do betão*, Vol 1. Lisboa, LNEC.

SOUSA-COUTINHO, A. *et al.*- (1997), *Fabrico e propriedades do betão*. Vol. 1 e Vol.2, 3ª edição. Lisboa, LNEC.

SOUSA-COUTINHO, J.- (2006), *Materiais de Construção 2 - Ligantes e caldas*. Porto: Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto.

SOUZA, P. *et al.*- (2005). *Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity*. Cement and Concrete Research, 35, 10, 1993-1998.

STEFANIDOU, M. *et al.*- (2005), *The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars*. Cement and Concrete Composites, Elsevier, 27, 914-919.

TAVARES M. *et al.*- (2008), *Repair mortars for a maritime fortress of the XVII the century*, Medasch, International Conference on Construction Heritage in Coastal and Marine Environment, Lisboa, LNEC.

TAVARES, E.- (2008a), *Reacção pozolânica de metacaulinos e diatomites em argamassas de reabilitação*, Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, SAEC/UA.

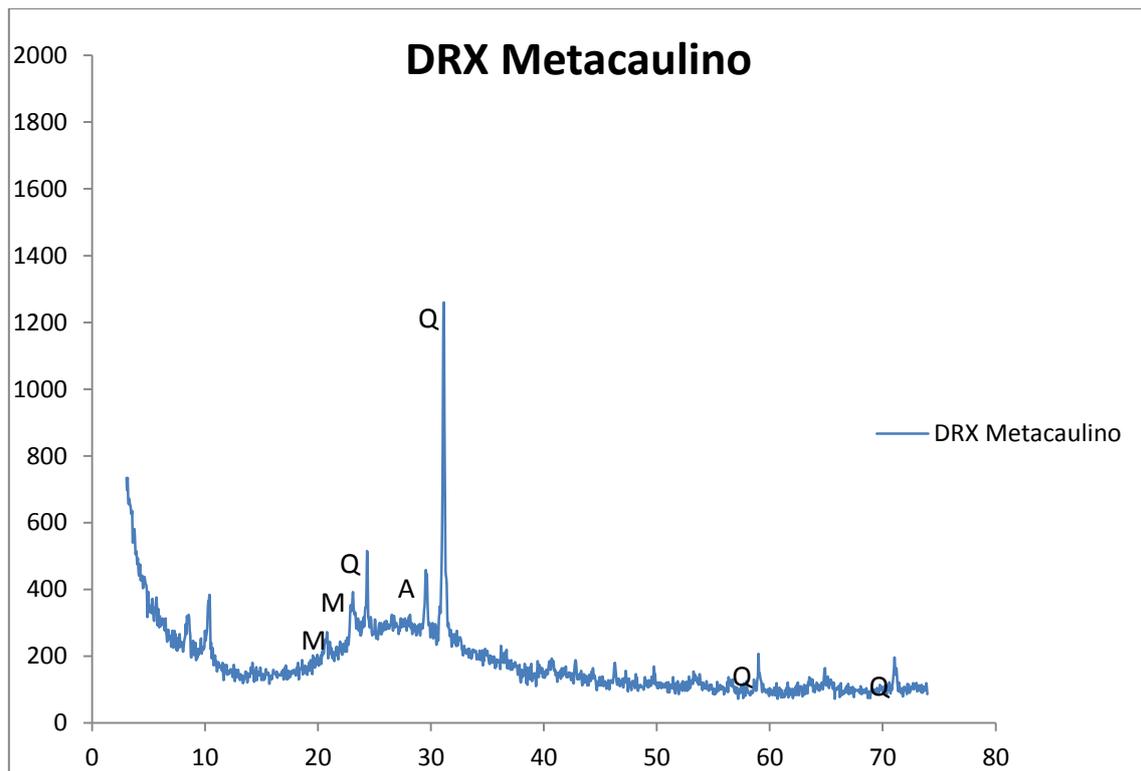
VEIGA, R. (2003), *Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes.*, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. Lisboa, LNEC.

VELOSA, A. (2006), *Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas*. Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, SAEC/UA.

WALKER, R. *et al.*- (2011), *Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime-pozzolan pastes*. Materials and Structures, 44, 1139-1150.

WILD, S. *et al.*- (1996), *Relative strength, pozzonlanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete*. Cement and Concrete Research, 26, 10, 1537-1544.

ANEXO II – DRX do metacaulino



Q- Quartzo

M- Moscovite

A- Anatase

ANEXO III – Ficha técnica do cimento Portland

Cimento Portland CEM I 42,5R



CE
NP EN 197-1 0858

▶ **Constituintes**
Clinker 95%
Constituintes adicionais minoritários 5%
Sulfato de cálcio regulador de presa

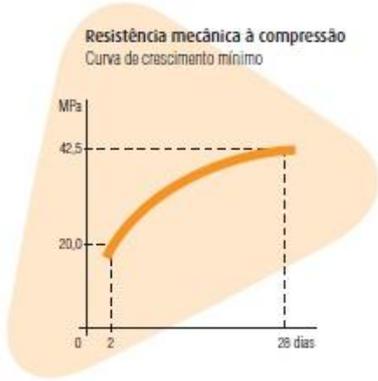
▶ **Características**

- ▶ **Químicas**
Perda ao fogo (P.F) 5,0%
Resíduo insolúvel (R.I) 5,0%
Sulfatos (SO₃) 4,0%
Cloretos (Cl) 0,10%
- ▶ **Físicas**
Início de presa (min) 60
Expansibilidade (mm) 10
- ▶ **Mecânicas**
Resistência à compressão
Valores mínimos
. 2 dias: 20,0 MPa
. 28 dias: 42,5 MPa

▶ **Propriedades especiais do betão fabricado com este cimento**

- ▶ Desenvolvimento rápido das resistências mecânicas
- ▶ Elevadas resistências a todas as idades

Resistência mecânica à compressão
Curva de crescimento mínimo



Tempo (dias)	Resistência mecânica à compressão (MPa)
2	20,0
28	42,5

ANEXO IV – Ficha técnica da cal aérea



Granulometria:		
Retido a 200 microns	≤	4%.
Teor em Água livre	≤	1%.
Teor em Ca(OH) ₂	≥	90%.
Teor em MgO	≤	3%.
Densidade aparente na ordem de 0,5.		

LUSICAL

F.P. 351 - CH 01 A - 06/2010



Lusical H

DESCRIÇÃO

A Lusical H é uma cal de construção utilizada como ligante, individual ou incorporada nas misturas formuladas. É aplicada principalmente nos rebocos, e duma forma geral na construção civil.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS e QUÍMICAS

Determinadas pelos métodos Laboratório Grupo em conformidade com os modos operatórios normalizados

Nos produtos formulados,

- a granulometria da Lusical H otimiza a eficácia do produto acabado.
- sua brancura garante uma qualidade constante dos rebocos.
- seu forte teor em hidróxido de cálcio dá ao reboco a trabalhabilidade e sua permeabilidade ao ar

DOSAGEM e APLICAÇÃO

A Lusical H é entregue sob a forma pulverulenta. Sua dosagem é feita a partir do silo de armazenamento. Ela é extraída do silo com a ajuda de equipamentos de descolmatação como fundos vibrantes, canhões de ar, ou desagregadores rotativos. O produto é transportado por parafusos sem fim. Os materiais de dosagem devem ter em conta as características físicas do produto - densidade, fluidez - respondendo às exigências de precisão requeridas.

CONDICIONAMENTO

Entregue em saco, big-bag e em sistema, a Lusical H é armazenada em silos estanques.

DADOS de SEGURANÇA

Ficha de segurança: hidróxido de cálcio.

O produtor garante que todas as diligências são efectuadas para o respeito dos critérios definidos. No entanto, trata-se de produtos naturais que podem apresentar ligeiras variações nas características físico-químicas sem incidência notável sobre a qualidade do produto



01-06-2010

Valverde—2025-201 Alcanede - Portugal
Telefone (+351)243 409 040: - Fax (+351) 243 400 474—E-mail: info.lusical@iholst.com

ARGICAL-M 1200S



PRODUCT SPECIFICATION
Caractéristiques produit

ARGICAL-M 1200S is an artificial pozzolana (metakaolin). It is obtained by micronizing and calcining a kaolinitic clay from the Charentes basin.
 ARGICAL-M 1200S is a dehydroxylated aluminium silicate. Its general formula is $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. It is an amorphous non-crystallized material, constituted of lamellar particles.
ARGICAL-M 1200S est une pouzzolane artificielle (métakaolin), obtenue par broyage et calcination d'une argile kaolinique du bassin des Charentes.
ARGICAL-M 1200S est un silicate d'alumine déshydroxylé, de composition générale $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. C'est un matériau amorphe, non cristallisé, dont les particules présentent une forme lamellaire

The technical details contained in this data sheet are given in all good faith for indicative purpose only, and do not constitute a guarantee by AGS Minéraux.

Sales are in accordance with our "Conditions of Sale", copies of which will be supplied on request.

Les informations contenues dans ce document sont données à titre purement indicatif. Les valeurs indiquées n'impliquent pas obligation pour le fournisseur, elles ne constituent en aucun cas une garantie sur le produit et sur ses spécifications.

Seule la fiche de spécification Contractuelle dans le cadre de nos Conditions Générales de Vente engage notre société auprès des clients.

PRODUCT USE

Additive for concretes, mortars and coatings, made from Portland cement or lime
Domaine d'utilisation
 Additif pour bétons, mortiers, revêtements à base de ciment Portland ou de chaux

CHEMICAL ANALYSIS

Analyse chimique

SiO ₂	55 %
Al ₂ O ₃	39 %
K ₂ O + Na ₂ O	1,0 %
Fe ₂ O ₃	1,8 %
TiO ₂	1,5 %
CaO + MgO	0,6 %

LOSS ON IGNITION

Perte au feu

1 %

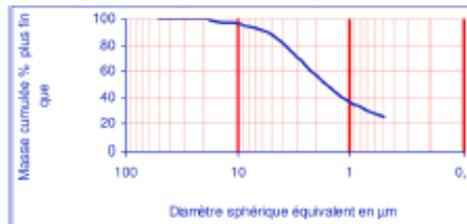
TYPICAL PHYSICAL CHARACTERISTICS

Caractéristiques physiques moyennes

pH	6
Pozzolanic index (Chapelle test) / Indice pouzzolanique	1400 mg Ca(OH) ₂ /g
Brightness photovolt blue filter / Blancheur photovolt filtre bleu	74 %
Specific area (BET) / Surface spécifique (BET)	19 m ² /g
Water demand (Marsh cone) / Demande en eau (Cône de Marsh)	1650 g/kg
Specific gravity / Masse spécifique	2,2 g/cm ³
Bulk density / Densité apparente	
Loose / Non tassé	250 kg/m ³
Tamped / Tassé	400 kg/m ³

SIEVE ANALYSIS

Distribution granulométrique – Inférieur à 2 µm : 55%



rac
 05 46 04 17 11
 Fax : +33 (0)5 46 04 21 05
 www.ags-mineraux.com
 commercial@ags-mineraux.com

Revision 4 – 2008/07/24

