



**Edson Miguel da
Silva Tavares**

**Reacção Pozolânica de Metacaulinos e Diatomites
em Argamassas de Reabilitação**



**Edson Miguel da
Silva Tavares**

**Reacção Pozolânica de Metacaulinos e Diatomites
em Argamassas de Reabilitação**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor Auxiliar no Departamento de Engenharia da Universidade de Aveiro e da Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa, Professora Auxiliar no Departamento de Engenharia da Universidade de Aveiro.

presidente

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim
Professor Associado da Universidade de Aveiro

o júri

Prof. Doutor João Freitas Coroado
Prof. Doutoramento I.P. Tomar

Prof. Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira (orientador)
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof^a Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa (co-orientador)
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Sendo este trabalho umas das etapas finais do meu percurso académico não quero deixar de agradecer a todos aqueles que directa ou indirectamente deram o seu contributo para a concretização do mesmo.

Aos Professores, Doutor Victor Ferreira e Doutora Ana Luísa Velosa por toda a ajuda e orientação que me disponibilizaram durante o decorrer deste trabalho.

À Eng.^a Helena Paiva, pelos seus comentários, críticas e pelo seu ensinamento e orientação.

Aos colegas de curso Patricia Miguel, pela disponibilidade concebida, cujo apoio e dedicação foi uma grande base de motivação para chegar ao fim.

A Doutora Teresa Caldeira pela ajuda prestada, e pelo material disponibilizado.

A minha namorada pelo apoio constante.

E finalmente aos meus pais, Manuel e Maria, pelo apoio incondicional, incentivo e confiança que sempre depositaram em mim.

A todos muito obrigada.

palavras-chave

Argamassas, pozolana, diatomite, metacaulino, materiais de construção, reabilitação.

resumo

O presente trabalho tem como objectivo principal determinar a reacção pozolânica de metacaulinos e diatomites e encontrar composições capazes de ser aplicadas como argamassas de reabilitação.

O trabalho faz referência a reabilitação de revestimentos antigos aos ligantes e materiais pozolânicos e ao seu papel nas argamassas de reabilitação. Descreve-se a metodologia experimental e os procedimentos de ensaio aplicados. O metacaulino e diatomite apresentaram uma elevada reacção pozolânica, especialmente no caso da diatomite. As composições onde se verificaram melhores resultados foram as de traço 1:2 agregado/ligante. Os resultados obtidos deram-nos excelentes indicações de que o metacaulino e diatomite são excelentes usados como aditivos pozolânicos em argamassas de reabilitação.

keywords

Mortars, pozzolanic, diatomite, metakaolin, construction materials, rehabilitation.

abstract

This work aims to determine the main reaction pozzolanic of metakaolin and diatomite and find compositions able to be implemented as mortars rehabilitation.

The work refers rehabilitation of old coatings, the binders and pozzolanic materials and its role in the mortars rehabilitation. Experimental methodology and the test procedures are presented. The metakaolin and diatomite had a high pozzolanic response in the case of diatomite. Specially where better results were found were the one with 1:2 binder/aggregate ratio. The results gave good indication that the metakaolin and diatomite are excellent used as binders using mortars to rehabilitation.

ÍNDICE:

| | |
|--|-----------|
| 1. A REABILITAÇÃO | 9 |
| 1.1. Introdução | 9 |
| 1.2. Revestimentos para Reabilitação | 10 |
| 1.2.1. Uma breve descrição das principais causas de deterioração de um revestimento antigo | 11 |
| 1.2.2. Argamassas de reabilitação | 13 |
| 1.2.3. Requisitos ou Propriedades fundamentais das argamassas de reabilitação | 14 |
| 1.2.4. Factores condicionantes | 16 |
| 2. ARGAMASSAS DE CAL AÉREA E ADITIVOS POZOLÂNICOS | 21 |
| 2.1. Introdução | 21 |
| 2.2. Argamassas de cal aérea | 23 |
| 2.3. Endurecimento da cal aérea | 27 |
| 2.4. Materiais pozolânicos | 30 |
| 2.4.1. Definição | 30 |
| 2.4.2. Classificação de materiais pozolânicos | 30 |
| 2.4.3. Reacção pozolânica | 33 |
| 2.4.4. Metacaulino | 37 |
| 2.4.5. Diatomites | 41 |
| 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 47 |
| 3.1. Materiais utilizados | 47 |
| 3.1.1. Agregados | 47 |
| 3.1.2. Ligantes e adições | 48 |
| 3.2. Determinação da reactividade pozolânica dos aditivos | 49 |
| 3.2.1. Princípio | 49 |
| 3.2.2. Reagentes | 50 |
| 3.2.3. Aparelhos | 51 |
| 3.2.4. Procedimento de ensaio | 51 |
| 3.2.4.1. Preparação das amostras com cimento e aditivos | 51 |
| 3.2.5. Standardização das soluções – Calculo dos factores f1 e f2 | 53 |
| 3.2.5.1. Standardização da solução de EDTA | 53 |
| 3.2.5.2. Standardização de 0,1 mol/l da solução de ácido clorídrico | 54 |
| 3.2.5.3. Determinação da concentração do ião hidróxido | 55 |
| 3.2.5.4. Determinação da concentração de óxido de cálcio | 56 |
| 3.2.5.5. Avaliação da pozolânidade | 57 |
| 3.3. Formulação de argamassas | 59 |
| 3.4. Execução e ensaios de consolidação das argamassas | 61 |
| 3.4.1. Cura dos provetes | 64 |
| 3.4.2. Densidade em fresco | 64 |
| 3.4.3. Determinação da consistência por espalhamento | 64 |
| 3.4.4. Reologia | 65 |
| 3.4.5. Ensaio de resistência mecânica à tracção por flexão | 66 |
| 3.4.6. Ensaio de resistência mecânica por compressão | 68 |
| 3.4.7. Capilaridade | 69 |
| 3.4.8. Avaliação indirecta do Modulo de Young (Pundit) | 70 |
| 3.5. Aplicação “in situ” Muro | 72 |
| 3.5.1. Aplicação “in situ” no muro de adobe das argamassas | 72 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.5.2. | Composição das argamassas _____ | 72 |
| 3.5.3. | Execução do revestimento _____ | 73 |
| 3.5.4. | Avaliação da dureza por Esclerômetro _____ | 74 |
| 3.5.5. | Avaliação de sulfatos e cloretos _____ | 74 |
| 4. | DISCUSSÃO DE RESULTADOS _____ | 77 |
| 4.1. | Reactividade pozolânica dos aditivos _____ | 77 |
| 4.2. | Características em fresco das argamassas _____ | 78 |
| 4.2.1. | Densidade em fresco _____ | 78 |
| 4.2.2. | Determinação da consistência por espalhamento _____ | 79 |
| 4.2.3. | Comportamento reológico das argamassas – Efeito dos aditivos _____ | 79 |
| 4.3. | Características das argamassas no estado endurecido _____ | 82 |
| 4.3.1. | Resistência mecânica _____ | 82 |
| 4.3.2. | Avaliação do módulo de young (Pundit) _____ | 84 |
| 4.3.3. | Capilaridade _____ | 86 |
| 4.4. | Ensaio “in situ” Muro de Adobe _____ | 87 |
| 4.4.1. | Aplicação _____ | 87 |
| 4.4.2. | Avaliação da dureza superficial (Esclerômetro) _____ | 89 |
| 4.4.3. | Determinação de sulfatos e cloretos _____ | 90 |
| 5. | CONCLUSÕES _____ | 93 |
| 6. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____ | 97 |

ÍNDICE DE FIGURAS:

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Organograma de Reabilitação [1] | 10 |
| Figura 2 - Reboco com falta de adesão entre camadas [4,5,6] | 12 |
| Figura 3 - Destacamento do reboco, surgimento de bolhas e lacunas [4,5,6] | 12 |
| Figura 4 - Revestimento com abaulamento do suporte, fissuras e destacamento da pintura [4,5,6] | 12 |
| Figura 5 - Consumo de cimento Portland nos últimos 50 anos [14] | 22 |
| Figura 7 - Cal aérea – ciclo da cal [10]..... | 26 |
| Figura 6 - Esquema da cal [4]..... | 26 |
| Figura 8 – Classificação de materiais pozolânicos [17]..... | 31 |
| Figura 9 - Classificação de materiais pozolânicos [17] | 31 |
| Figura 10 - Classificação de materiais pozolânicos [17] | 32 |
| Figura 11 - Classificação de materiais pozolânicos [17] | 32 |
| Figura 12 - Efeito do teor de pozolana na taxa de calor de hidratação [18]..... | 35 |
| Figura 13 - Controlo da expansão álcali-agregado pelo uso de pozolâna no betão [18]. | 36 |
| Figura 14 – Metacaulino [10]..... | 37 |
| Figura 15 - Resistência à compressão de argamassas contendo metacaulino e sílica activa [18] | 38 |
| Figura 16 - Evolução do hidróxido de cálcio com o tempo de hidratação [18] | 39 |
| Figura 17 - Evolução da expansão de prismas de betão contendo metacaulino [18] | 40 |
| Figura 18 - Resistência à compressão de betões com metacaulino [18]..... | 40 |
| Figura 19 - Gyrosigma fasciola [23]..... | 42 |
| Figura 20 – Navicula gregária [23] | 42 |
| Figura 21 - Surirella cf.brightwellii [23]..... | 42 |
| Figura 22 - Principais produtores mundiais de diatomites [10] | 43 |
| Figura 23 – Curva granulométrica da areia utilizada..... | 47 |
| Figura 24 - Peneiro de 150 µm..... | 52 |
| Figura 25 - Frasco de polietileno..... | 52 |
| Figura 26 - Estufa utilizada | 52 |
| Figura 27 - Placa de aquecimento..... | 53 |
| Figura 28 - Titulação (cor rosa) | 54 |
| Figura 29 - Titulação (cor amarela) | 55 |
| Figura 30 - Diagrama para a determinação da pozolânicidade (NP EN 196-5) | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 31 - Métodos de determinação da reactividade de uma pozolâna | 58 |
| Figura 32 - Métodos de determinação da reactividade de uma pozolâna | 58 |
| Figura 33 - Visualização do processo de pesagem e do saco tipo utilizado e posterior mistura dos agregados..... | 62 |
| Figura 34 - Misturadora | 62 |
| Figura 35 - Ensaio de espalhamento | 63 |
| Figura 36 - Visualização dos provetes..... | 63 |
| Figura 37 - Câmara húmida..... | 64 |
| Figura 38 - Espalhamento da argamassa | 65 |
| Figura 39 - Reometro utilizado para argamassas (Viskomat) | 66 |
| Figura 40 - Ensaio de resistência à tracção por flexão..... | 67 |
| Figura 41 - Ensaio de resistência por compressão..... | 68 |
| Figura 42 - Ensaio de capilaridade..... | 69 |
| Figura 43 - Pesagem continua ao longo do tempo dos provetes | 69 |
| Figura 44 - Pundit | 71 |
| Figura 45 - Transmissão directa..... | 71 |
| Figura 46 - Calibração do aparelho..... | 72 |
| Figura 47 - Processo de mistura | 73 |
| Figura 48 - Aplicação das argamassas..... | 73 |
| Figura 49 - Esclerómetro..... | 74 |
| Figura 50 - Sulfatos e Cloretos..... | 74 |
| Figura 51 - Diagrama para a determinação da pozolânicidade | 78 |
| Figura 52 - Variação do torque em função do tempo de ensaio para a diatomite..... | 80 |
| Figura 53 - Variação do torque em função do tempo de ensaio para o metacaulino..... | 80 |
| Figura 54 - Viscosidade contendo diatomite | 81 |
| Figura 55 - Viscosidade contendo metacaulino | 81 |
| Figura 57 - Tensão de cedência contendo pozolâna de metacaulino | 82 |
| Figura 56 - Tensão de cedência contendo pozolâna de diatomite | 82 |
| Figura 58 - Grupo de composições (1) e (2) metacaulino | 88 |
| Figura 59 - Grupo de composições (1) e (2) diatomite..... | 88 |
| Figura 60 – Medições efectuadas pelo esclerómetro..... | 89 |
| Figura 61 – Conversão de leitura do esclerómetro em valores de resistência mecânica a compressão | 89 |
| Figura 62 - Zonas de estudo | 90 |

ÍNDICE DE TABELAS:

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Requisitos mínimos para argamassas de revestimento para edifícios antigos [11]..... | 15 |
| Tabela 2 - Requisitos das argamassas de substituição características mecânicas [11] | 15 |
| Tabela 3 - Requisitos das argamassas de substituição comportamento à água [11] | 16 |
| Tabela 4 - Classificação do estado de conservação do revestimento [6]..... | 17 |
| Tabela 5 - Critérios gerais de decisão sobre o tipo de intervenção [6]..... | 18 |
| Tabela 6 - Classificação das cais de construção de acordo com a normalização europeia..... | 24 |
| Tabela 7 - Composição das argamassas [7] | 27 |
| Tabela 8 - Resultados dos ensaios às características mecânicas das argamassas [7] | 28 |
| Tabela 9 - Resultados dos ensaios às características de comportamento à água das argamassas [7]..... | 29 |
| Tabela 10 - Classificação dos materiais pozolânicos quanto à origem [10]..... | 33 |
| Tabela 11 - Composição química de diatomites comerciais (%) [10] | 44 |
| Tabela 12 - Distribuição granulométrica da areia utilizada | 48 |
| Tabela 13 - Densidades aparentes dos ligantes e agregados da cal aérea | 48 |
| Tabela 14 - Características da diatomite | 49 |
| Tabela 15 - Resumo do Grupo de Composições | 59 |
| Tabela 16 – Grupo de Composições (1) das argamassas (em gramas)..... | 60 |
| Tabela 17 - Grupo de Composições (2) das argamassas (em gramas)..... | 60 |
| Tabela 18 - Grupo de Composições (3) das argamassas (em gramas)..... | 61 |
| Tabela 19 - Grupo de Composições (1) das argamassas para o muro (em gramas)..... | 72 |
| Tabela 20 - Grupo de Composições (2) das argamassas para o muro (em gramas)..... | 73 |
| Tabela 21 – Comparação de [OH ⁻] e [CaO] nas amostras ensaiadas..... | 77 |
| Tabela 22 - Densidades em fresco dos provetes..... | 78 |
| Tabela 23 - Consistência por espalhamento..... | 79 |
| Tabela 24 - Resistência mecânica à tracção por flexão e por compressão..... | 83 |
| Tabela 25 – Avaliação Modulo Young Grupo de composições (1) | 84 |
| Tabela 26 - Avaliação Modulo Young Grupo de composições (2) | 85 |
| Tabela 27 - Avaliação Modulo Young Grupo de composições (3) | 85 |
| Tabela 28 – Capilaridade..... | 86 |

| | |
|--|-----------|
| Tabela 29 - Valores obtidos pelo esclerômetro | 89 |
| Tabela 30 - Valores de sulfatos e cloretos | 90 |

- 1. A REABILITAÇÃO**
 - 1.1. Introdução
 - 1.2. Revestimentos para Reabilitação

1. A REABILITAÇÃO

1.1. Introdução

A reabilitação, entendida como o conjunto de actividades conducentes ao aumento do nível de qualidade dos edifícios, ou seja, os níveis de prestação de serviço em termos construtivos, ambientais, funcionais, estéticos e de segurança que o mesmo proporciona, até há alguns anos atrás, era sistematicamente relegada para um plano de importância inferior, em relação à construção nova. Esta situação pode ser facilmente comprovada com a constatação da existência de poucos exemplos de trabalhos de investigação realizados, ou com a falta de regulamentação específica na área da reabilitação [1].

O carácter pontual das intervenções então realizadas, que se desenvolveram de uma forma descontextualizada, com enormes falhas de rigor científico e de adequados conhecimentos técnicos, não permitiu o apetrechamento do país com os necessários instrumentos técnicos [2], administrativos, regulamentares e financeiros adequados a uma prática mais global da reabilitação, à semelhança do que se verificou nos restantes países europeus [3].

Esta situação específica que se tem verificado nestas duas últimas décadas em Portugal, atinge neste momento uma inversão no sentido do aumento gradual e progressivo, nos próximos anos, do peso da reabilitação na construção. Se por um lado grande parte do parque habitacional em Portugal é bastante recente, apresenta, na maioria dos casos, significativas anomalias motivadas pela falta de rigor e qualidade no projecto, má execução e materiais mal aplicados que inevitavelmente tenderão a acelerar a necessidade da realização de operações de conservação e reabilitação, tanto mais que os padrões de qualidade relacionados com o conforto, novas tecnologias, segurança e estética se tornam cada vez mais elevados [1].

Verifica-se assim, uma necessidade de adequação à reabilitação, dos regulamentos em vigor, relacionados com a construção nova, da certificação e da disponibilização das propriedades dos produtos por parte dos fabricantes, da existência de ferramentas práticas de apoio aos intervenientes num processo de reabilitação [1].

Para além das carências verificadas, as novas necessidades e exigências que a actividade da reabilitação exige, tornam hoje esta actividade numa das que apresenta maiores perspectivas de trabalho e investigação, no decurso dos próximos anos. Passa em grande parte pelos intervenientes directamente ligados à construção, a preparação atempada e adequada de metodologias novas, ou a adaptação às especificidades da

construção portuguesa de metodologias comprovadamente eficazes, utilizadas em outros países. Passa também pela criação, adaptação a cada país e implementação de normas específicas sobre reabilitação, tal como a Norma Europeia 15043, pela certificação dos produtos e elementos construtivos utilizados para essas operações e pela sensibilização e formação adequada tanto dos intervenientes no processo como dos proprietários dos imóveis [1].

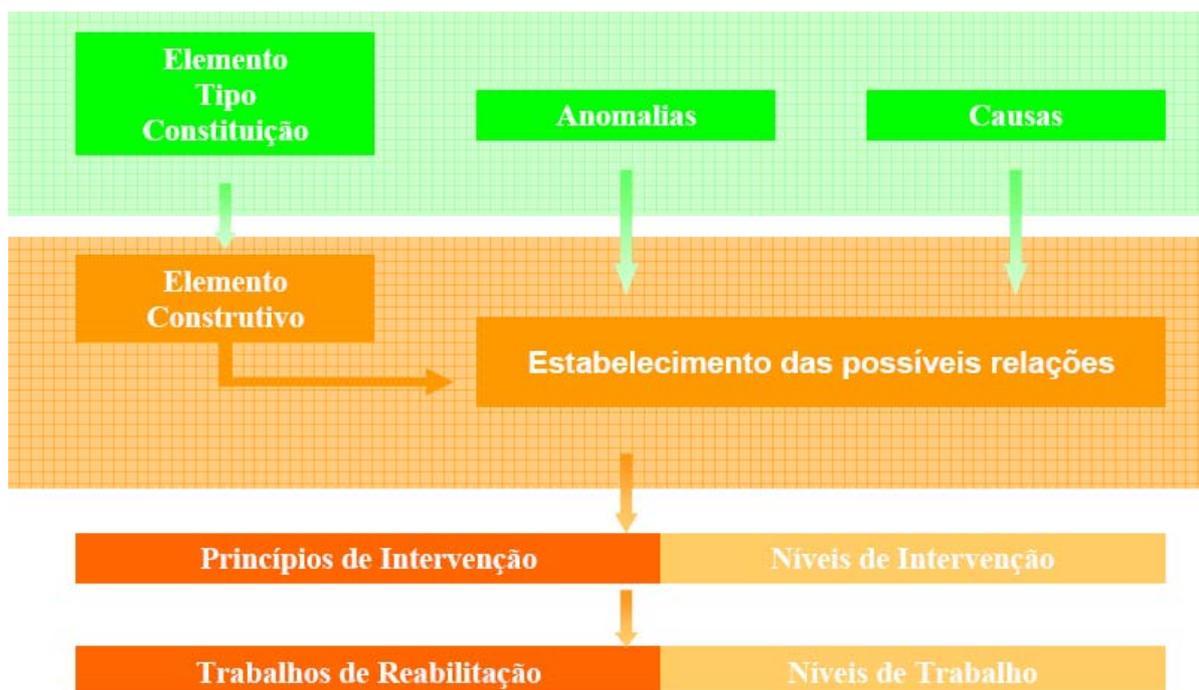


Figura 1 - Organograma de Reabilitação [1]

1.2. Revestimentos para Reabilitação

Os revestimentos exteriores que cobrem as superfícies murarias das fachadas exteriores de um edifício histórico são elementos fundamentais da estrutura edificada, pois além de terem uma função protectora, também possuem, muitas vezes, uma função decorativa relevante. Sendo assim testemunho do tempo e do passado, estas camadas devem ser preservadas devido à sua importância técnica, histórica e estética [4,5,6].

Como estes acabamentos são renovados ao longo do tempo, muitos destes revestimentos foram tratados sem nenhuma preocupação científica quanto aos seus valores estéticos, culturais e técnicos. Desta forma muitas destas técnicas ancestrais já foram perdidas. A manutenção das fachadas externas passa pela conservação das técnicas construtivas tradicionais e pelo uso de materiais de reparação e renovação

compatíveis e o mais similares possível aos originais. Além do restauro da técnica e materiais, temos de conservar a imagem arquitectónica do edifício onde materiais e cor têm de estar em harmonia com a fachada, valorizando a arquitectura da época [4,5,6].

É importante salientar, que os métodos empregados para a conservação e o restauro de revestimentos exteriores, variam conforme o tipo de deterioração e os materiais necessários para a sua preservação. Deste modo, é necessária, em qualquer trabalho de restauro, uma análise prévia criteriosa do estado de conservação do revestimento, e que esta acção seja realizada por um profissional capacitado, para que sejam correctamente estabelecidos os métodos e materiais usados [4,5,6].

1.2.1. Uma breve descrição das principais causas de deterioração de um revestimento antigo

Os revestimentos antigos são na sua grande maioria constituídos por argamassa de cal e areia, eventualmente com adições minerais e aditivos orgânicos, apresentando diversas camadas com finalidades diferentes: emboço, reboco, esboço, barramento e pintura (lisa ou decorativa). Estes revestimentos possuem características diferentes dos revestimentos modernos (com base em cimento), são bastante porosos e hidrófilos, ou seja permitem a entrada de água para o interior da alvenaria mas evitam a permanência prolongada, procurando promover a sua fácil e rápida saída para o exterior [7].

As principais causas de deterioração de um revestimento exterior são, em geral, as mesmas que afectam as estruturas arquitectónicas. A deterioração de um revestimento ocorre devido a vários factores: físicos, mecânicos, químicos ou biológicos, sendo uma das principais forma de degradação a perda da coesão, que é a perda da resistência mecânica de camadas de reboco, devido à perda ou alteração dos traços de ligação entre partículas; e a perda de aderência (Figura 4), que é a separação ou destacamento que pode ocorrer entre as diferentes camadas de um reboco ou entre o reboco e o suporte. Estas degradações provocam no revestimento o surgimento de várias anomalias: escamação, destacamento (Figura 2 e 4), descolamento, desagregação, enfarinhamento, pulverulência, fissuração e lacunas [8].

As intervenções de conservação e restauro a realizar sobre edifícios antigos devem respeitar o funcionamento original dos revestimentos, caso contrário podem provocar patologia mais grave que as anteriormente encontradas, exigindo assim um bom conhecimento da constituição e funcionamento dos revestimentos antigos [4,5,6].



Figura 2 - Reboco com falta de adesão entre camadas [4,5,6]

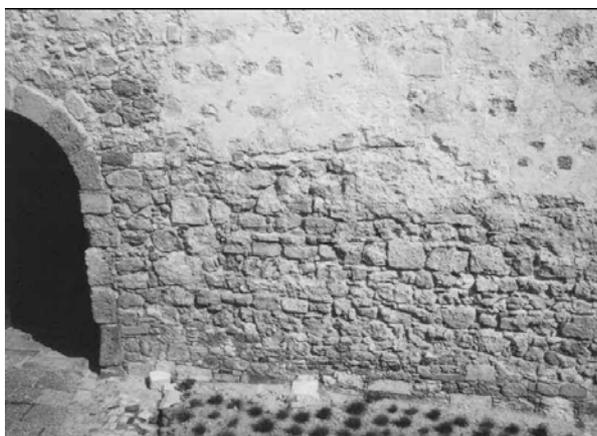


Figura 3 - Destacamento do reboco, surgimento de bolhas e lacunas [4,5,6]



Figura 4 - Revestimento com abaulamento do suporte, fissuras e destacamento da pintura [4,5,6]

1.2.2. Argamassas de reabilitação

Muitas argamassas têm sido recomendadas para revestimentos de edifícios antigos. As soluções mais usadas enquadram-se, normalmente, nos seguintes tipos [9]:

- Argamassas de cimento
- Argamassas de cal hidráulica natural
- Argamassas de cal hidráulica artificial
- Argamassas de cal aérea e cimento
- Argamassas de cal aérea
- Argamassas de cal aérea com adições pozolânicas: pozolanas naturais, metacaulino, cinzas volantes, sílica-fumo, diversos resíduos industriais com propriedades pozolânicas (vidro moído, resíduos da indústria cerâmica, resíduos de argila expandida, etc.)
- Argamassas pré-doseadas
- Argamassas de cal aérea pura ou com adjuvantes
- Argamassas de ligantes especiais

Algumas destas argamassas têm inconvenientes bem conhecidos para algumas aplicações. Assim, as argamassas de cimento apresentam um aspecto final muito diferente das argamassas antigas, em termos, por exemplo, da textura da superfície, do modo como reflectem a luz. Para além disso, é sabido que contêm na sua composição sais solúveis que são transportados para o interior das paredes e lá cristalizam, contribuindo para a sua degradação. Tem-se verificado que também outras características são desfavoráveis, como uma rigidez excessiva e uma capacidade limitada de permitir a secagem da parede [9].

Por outro lado, as argamassas de cal aérea, de composição mais próxima das argamassas antigas, portanto mais capazes de assegurar um aspecto estético compatível, têm apresentado problemas de durabilidade, principalmente quando expostas à chuva e, ainda mais, ao gelo. No entanto, chegaram até aos nossos dias argamassas de cal com centenas e, até, milhares de anos, que se apresentam com resistência e coesão superiores a muitas argamassas actuais [9].

As argamassas intermédias entre estes dois extremos procuram melhorar algumas características sem trazer os piores inconvenientes. A cal hidráulica, quer natural quer artificial, podem originar melhores resultados. Do mesmo modo, traços de argamassas bastardas um pouco diferentes podem resultar em melhorias significativas de comportamento.

As argamassas pré-doseadas têm composições muito variadas, e, em consequência, características e comportamentos diversificados, pelo que terão sempre que ser avaliadas caso a caso.

É conveniente enfatizar que não são apenas as características dos materiais que influenciam o comportamento, a durabilidade e, em geral, a qualidade do revestimento, uma vez que as técnicas de preparação e aplicação, as condições climáticas e de cura e a preparação do suporte são igualmente importantes e a sua influência encontra-se em estudo.

Em estudos anteriores definiram-se as características básicas a respeitar por argamassas a seleccionar para revestir paredes de edifícios antigos. Essas exigências são agora aplicadas a um conjunto de argamassas dos vários tipos referidos como soluções possíveis, com o objectivo de definir campos de aplicação e apontar caminhos a seguir [9].

1.2.3. Requisitos ou Propriedades fundamentais das argamassas de reabilitação

A adequabilidade dos materiais a usar na realização de revestimentos de substituição prende-se com critérios de compatibilidade, funcionais, de aspecto e de comportamento futuro em conjunto, tentando evitar, nomeadamente, o surgimento de fenómenos de envelhecimento diferencial entre novos e velhos revestimentos.

Em síntese, admitem-se os seguintes princípios básicos para a formulação das argamassas de substituição (Tabela 1): (i) As características mecânicas devem ser semelhantes às das argamassas originais e inferiores às do suporte; (ii) A aderência nunca deve ter rotura coesiva pelo suporte; (iii) A tensão desenvolvida por retracção restringida deve ser inferior à resistência à tracção do suporte; (iv) A capilaridade, a permeabilidade ao vapor de água e a facilidade de secagem devem ser semelhantes às argamassas originais e superiores às do suporte; (v) Devem adequar-se ao papel funcional e estético das argamassas que substituem (rebocos, juntas, acabamentos etc.); (vi) Devem possuir durabilidades e envelhecerem de forma similar e não devem provocar halos ou alterações de cor em revestimentos adjacentes preservados.

Para diferentes tipos de paredes, por exemplo para alvenarias de pedra aparelhada, estes requisitos deverão sofrer adaptações (Tabela 2 e 3).

Naturalmente, nos casos de reparações localizadas e de preenchimento de lacunas, os materiais a usar terão que verificar requisitos muito mais rigorosos devendo,

nomeadamente, ter composições muito semelhantes aos pré-existentes, ao nível dos constituintes – tipo de cal, natureza, granulometria e cor da areia – e da técnica de preparação e aplicação.

Por último, não é demais enfatizar a importância das técnicas de preparação e aplicação das argamassas, decisivas para o desempenho e a durabilidade dos revestimentos, com destaque para a quantidade de água de amassadura, o número e espessura das camadas, o “aperto da massa”, as condições de cura [10].

Tabela 1 - Requisitos mínimos para argamassas de revestimento para edifícios antigos [11]

| Argamassa | Características mecânicas aos 90 dias (MPa) | | | Aderência aos 90 dias (Mpa) | Comportamento à água |
|--|--|-----------|-------------|--|--|
| | Rf | Rc | E | | Ensaio Clássico |
| | | | | | C (kg/m ² .h ^{0,5}) |
| Reboco exterior | 0,2 - 0,7 | 0,4 - 2,5 | 2000 - 5000 | 0,1 - 0,3 ou com rotura coesiva pelo reboco | 8 < C < 12 |
| Reboco interior | 0,2 - 0,7 | 0,4 - 2,5 | 2000 - 5000 | 0,1 - 0,3 ou com rotura coesiva pelo reboco | - |
| Juntas | 0,4 - 0,8 | 0,6 - 3 | 3000 - 6000 | 0,1 - 0,5 ou com rotura coesiva pela argamassa | 8 < C < 12 |
| Requisitos adicionais a estabelecer se forem conhecidas as características das argamassas originais e do suporte | | | | | |
| Reboco exterior | Características mecânicas semelhantes às das argamassas originais e inferiores às do suporte | | | Nunca deve ser coesiva com a rotura pelo suporte | Capilaridade semelhante às argamassas originais e superiores às do suporte |
| Reboco interior | | | | | |
| Juntas | | | | | |

Tabela 2 - Requisitos das argamassas de substituição características mecânicas [11]

| Argamassas | Características Mecânicas | | | Aderência ao suporte (Ra) | Forças desenvolvidas por retracção restringida (Fr máx) |
|--------------------------|--|-----------------------|---------------------|---|--|
| | Resist. à flexão (Rt) | Resist. à compr. (Rc) | Módulo de Elastic € | | |
| Reboco exterior | | | | | |
| Reboco interior | Características Mecânicas semelhantes as das argamassas originais e inferiores as do suporte | | | Resistência ao arrancamento (Ra) inferior a resistência a tracção do suporte: a rotura nunca deve ser coesiva pelo suporte. | Força máxima desenvolvida por retracção restringida (Fr max) inferior a resistência a tracção do suporte |
| Refecha-mento das juntas | | | | | |

Tabela 3 - Requisitos das argamassas de substituição comportamento à água [11]

| Argamassas | Comportamento a água | | Comportamento aos sais | Comportamento térmico | Durabilidade | |
|-------------------------|---|---------------------------|---|-----------------------------|--|--|
| | Perm. ao vapor de água | Coefic. de capilaridade C | Porosidade | Teor de sais solúveis | Características térmicas | Resistência as acções climáticas; resistência aos sais |
| Reboco exterior | | | Porosidade e porosimetria semelhante as das argamassas originais e com maior percentagem de poros grandes que o suporte | | | |
| Reboco interior | Capilaridade e permeabilidade ao vapor de água semelhante as argamassas originais e superiores as do suporte. | | | Baixo teor de sais solúveis | Coeficiente de dilatação térmica e condutibilidade térmica semelhantes aos das argamassas originais e as do suporte. | Media a elevada |
| Refechamento das juntas | | | | | | |

1.2.4. Factores condicionantes

O cruzamento sistematizado destes aspectos (Tabela 1 a 3) permite o estabelecimento de uma classificação do estado de conservação do revestimento, relacionada com o tipo de intervenção mínimo (isto é, o que se situa do lado da máxima preservação) de que se apresenta uma primeira aproximação na Tabela 4 [12].

Naturalmente, a interpretação e quantificação dos factores em presença envolvem aspectos subjectivos e exigem, como sempre, experiência e bom senso do técnico responsável [12].

Após análise da influência do estado de conservação do revestimento podem definir-se, de forma mais geral, as opções de intervenção e os critérios gerais a ter em conta, cujas bases procuram estabelecer-se na Tabela 5, considerando também o factor valor do edifício. O factor disponibilidade de meios não foi considerado, devido à dificuldade de contabilizar e ao risco de o sobrevalorizar [12].

Tabela 4 - Classificação do estado de conservação do revestimento [6]

| Tipo de anomalia | Grau | Intervenção mínima | Classificação |
|---|-------------|--|----------------------|
| Fendilhação | Elevado | Reparação localizada | Severidade 3 |
| | Médio | Reparação localizada superficial | Severidade 2 |
| | Reduzido | Manutenção | Severidade 1 |
| Eflorescências e Criptoflorescências | Elevado | Substituição parcial | Severidade 4 |
| | Médio | Reparação localizada | Severidade 3 |
| | Reduzido | Reparação localizada superficial | Severidade 2 |
| Biodeterioração | Elevado | Reparação localizada | Severidade 3 |
| | Médio | Reparação localizada superficial | Severidade 2 |
| | Reduzido | Manutenção (com tratamento biocida) | Severidade 1 |
| Perda de aderência | Elevado | Substituição parcial | Severidade 5 |
| | Médio | Preenchimento de lacunas | Severidade 4 |
| | Reduzido | Consolidação (recolagem ao suporte ou entre camadas) | Severidade 3 |
| Perda de coesão ou Desagregação | Elevado | Substituição parcial | Severidade 5 |
| | Médio | Substituição parcial | Severidade 4 |
| | Reduzido | Consolidação | Severidade 3 |
| Erosão | Elevado | Reparação localizada | Severidade 2 |
| | Médio | Manutenção | Severidade 1 |
| | Reduzido | Manutenção | Severidade 1 |

Tabela 5 - Critérios gerais de decisão sobre o tipo de intervenção [6]

| Estado de conservação | Valor do edifício | Opção de intervenção | Seleção dos Materiais | Seleção das técnicas | Outras exigências |
|-----------------------|-------------------|--|-------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Severidade 1 | Elevado | Conservação e manutenção | Compatíveis e idênticos | Tradicionais e/ou especializadas | Reversibilidade;Aspecto idêntico |
| | Reduzido | Conservação e manutenção | Compatíveis | Regras de boa arte | Reversibilidade;Aspecto compatível |
| Severidade 2 | Elevado | Consolidação e/ou Reparação localizada | Compatíveis e idênticos | Tradicionais e/ou especializadas | Reversibilidade;Aspecto idêntico |
| | Reduzido | Reparação localizada e/ou substituição parcial | Compatíveis | Regras de boa arte | Reversibilidade;Aspecto compatível |
| Severidade 3 | Elevado | Consolidação e/ou Reparação localizada | Compatíveis e idênticos | Tradicionais e/ou especializadas | Reversibilidade;Aspecto idêntico |
| | Reduzido | Substituição parcial | Compatíveis | Regras de boa arte | Reversibilidade;Aspecto compatível |
| Severidade 4 | Elevado | Preenchimento de lacunas ou substituição parcial | Compatíveis e idênticos | Tradicionais e/ou especializadas | Reversibilidade;Aspecto idêntico |
| | Reduzido | Substituição parcial ou integral | Compatíveis | Regras de boa arte | Reversibilidade;Aspecto compatível |
| Severidade 5 | Elevado | Substituição parcial | Compatíveis e idênticos | Tradicionais e/ou especializadas | Reversibilidade;Aspecto idêntico |
| | Reduzido | Substituição integral | Compatíveis | Regras de boa arte | Reversibilidade;Aspecto compatível |

2. ARGAMASSAS DE CAL AÉREA E ADITIVOS POZOLÂNICOS

- 2.1. Introdução
- 2.2. Argamassas de cal aérea
- 2.3. Endurecimento da cal aérea
- 2.4. Materiais pozolânicos

2. ARGAMASSAS DE CAL AÉREA E ADITIVOS POZOLÂNICOS

2.1. Introdução

A construção desempenha um papel essencial nas civilizações desde o início, pois o homem sempre buscou materiais que lhe permitissem construir, e a evolução da arquitectura impulsionou a procura por produtos que fossem facilmente manuseáveis em estado fresco, mas muito resistentes depois de endurecidos sob condições ambientais normais. O homem já utilizou uma gama enorme de materiais, com intuito de descobrir aquele que oferecesse as melhores propriedades aglomerantes [13].

As argamassas são uma classe maioritária de materiais de construção que nos acompanha há mais de nove milénios. Trata-se de um ligante que é misturado com água, finos e agregados para formar uma massa fluida que pode ser moldada facilmente, e em seguida endurecer espontaneamente em condições ambientais normais. Esta aparente simplicidade não é atingida por nenhuma outra substância existente, o que torna esta classe de material única [14].

O primeiro contacto, que se tem conhecimento, da humanidade com argamassas ocorreu em 7000 a.C., na Galileia, em Israel, onde um piso de argamassa foi descoberto em 1985 em Yiftah El (Malinowski e Garfinkel, 1991; Ronen *et al.*, 1991). Um uso mais intenso de materiais ligantes teve início na antiga civilização Egípcia, há cerca de 3000 a.C., onde, segundo Snell e Snell (2000), foram utilizados na construção das pirâmides para a ligação dos blocos de rocha [13].

Existe a crença de que a tecnologia foi difundida pelos países ao redor do Mediterrâneo onde foram utilizados na antiguidade clássica (300 a.C. até 200 d.C.) pelos gregos e romanos, que misturando tufo vulcânico (rico em sílica vítrea e/ou microcristalina, chamado pozolâna) com cal e água, obtiveram silicatos de cálcio hidratados, que possuem propriedades ligantes, aglomerantes ou cimentícias. As construções realizadas com este composto continuam estáveis até hoje [13].

Apesar da utilização de materiais cimentícios ser bastante antiga, somente em 1824 que um inglês (Joseph Aspdin) patenteou um cimento produzido artificialmente pela calcinação de um calcário argiloso, denominado como cimento Portland (CP), pois após a presa o cimento se assemelhava muito ao calcário da ilha de Portland, muito utilizada na Grã-Bretanha naquela época. A indústria de cimento Portland, na sua configuração actual, foi baseada nesta patente.

Esta indústria tem sido um elemento vital e continua desempenhando seu papel essencial como uma indústria chave na sociedade moderna em sua evolução contínua, ela supre necessidades básicas do ser humano de abrigo e proporciona a infra-estrutura para actividades industriais e comerciais, que são as actividades que impulsionam o avanço e o bem estar da sociedade. Os materiais são os pilares da indústria da construção civil; eles determinam a qualidade do produto final e a tecnologia com o qual é produzido. Assim, a evolução do desempenho das estruturas e suas respectivas eficiências e produção industrializada são directamente influenciadas pelas características dos materiais envolvidos. Percebemos facilmente que as inovações na construção estão altamente ligadas ao desenvolvimento de avançados materiais de construção [14].

Actualmente, com o desenvolvimento da humanidade, as construções são cada vez mais numerosas e de maior porte, crescendo o consumo (Figura 5) de cimento vertiginosamente, sendo o material mais consumido pela humanidade depois da água, já que este é componente essencial na produção do material mais utilizado na construção civil actualmente no mundo, o betão, além de ser utilizado na produção de inúmeros outros produtos, como argamassas, blocos etc.

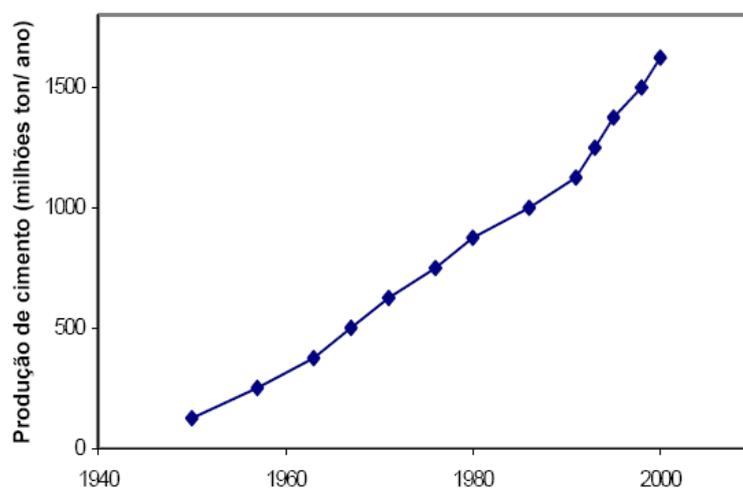
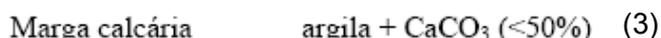
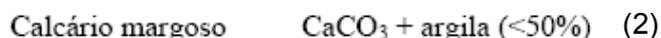
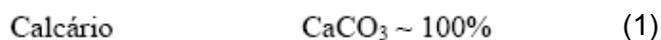


Figura 5 - Consumo de cimento Portland nos últimos 50 anos [14]

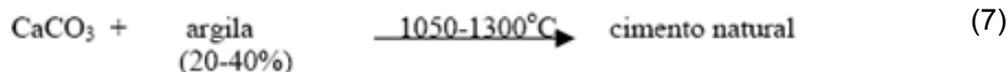
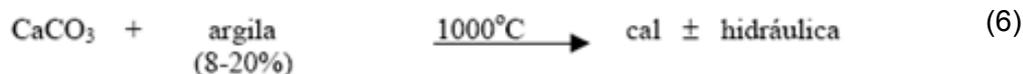
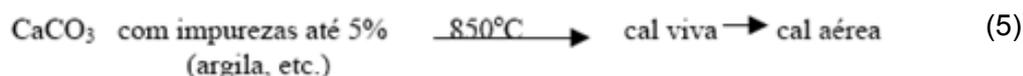
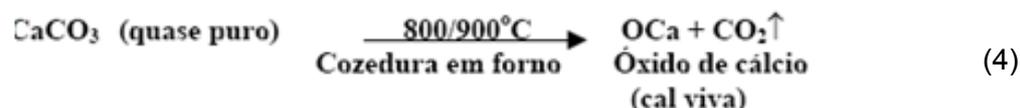
No entanto, para algumas aplicações, como o caso de edifícios antigos devem usar-se argamassas de reabilitação com outros ligantes mais compatíveis com as de cal aérea.

2.2. Argamassas de cal aérea

Um dos ligantes artificiais mais antigos é o ligante que resulta da cozedura dos calcários (Equação 1), constituídos sobretudo por CaCO_3 , mais abundante na natureza [9]. Associada a este mineral existe sempre a argila, em maior ou menor quantidade, porque a precipitação do carbonato de cálcio arrasta consigo a argila que porventura esteja em suspensão. Obtém-se então o calcário margoso (Equação 2) e quando a argila é em quantidade superior ao carbonato forma-se uma marga calcária (Equação 3). Assim, os calcários podem ser muito puros ou conterem quantidades variáveis de argila.



A cozedura do calcário puro (Equação 4) dá origem ao óxido de cálcio, que constitui a cal aérea (Equação 5); a cozedura do calcário margoso dá origem às cal mais ou menos hidráulicas (Equação 6), conforme o teor de argila, e também aos cimentos naturais (Equação 7).



Quanto ao teor de impurezas, as cals aéreas dividem-se em gordas e magras. As cals aéreas gordas derivam de calcários quase puros com teores de carbonato não inferiores a 99% e são brancas. As cals aéreas magras (acinzentadas) derivam de calcários com teores de argila e de outras impurezas compreendidos entre 1 a 5%.

Chamam-se gordas as primeiras devido as suas propriedades plásticas, pois trata-se de cais facilmente trabalháveis e bastante macias. As cais magras não são tão fáceis de trabalhar nem tão macias. A reacção de presa é a mesma para qualquer delas.

Como o magnésio aparece muitas vezes associado ao cálcio, são frequentes na natureza calcários com maior ou menor percentagem de dolomite ($MgCO_3$). Assim a cal aérea pode ser cálcica quando é sobretudo constituída por óxido de cálcio (CaO) ou dolomítica constituída sobretudo por óxido de cálcio e óxido de magnésio. Segundo a normalização europeia, recentemente publicada EN 459 Building Lime Part 1: Definitions, Specifications and conformity criteria, da qual se transcreve o quadro e notas da Tabela 6, relativamente a composição química [21] uma cal aérea cálcica designa-se por uma sigla que contem as letras CL e uma cal aérea dolomítica designa-se por uma sigla que contem as letras DL.

Tabela 6 - Classificação das cais de construção de acordo com a normalização europeia

| | | Valores expressos em % de massa | | | | | | | |
|--------------------|----------------|---------------------------------|---------------|-------|-----------------|-------------------|-------------------|------|---|
| | | Tipo | CaO + MgC | MgO | CO ₂ | SO ₃ | Cal livre | | |
| Cais de construção | cal aérea L | cal cálcica CL | cal viva | CL 90 | ≥ 90 | ≤ 5 ²⁾ | ≤ 4 | ≤ 2 | - |
| | | | cal hidratada | CL 80 | ≥ 80 | ≤ 5 ²⁾ | ≤ 7 | ≤ 2 | - |
| | | cal dolomítica DL | cal viva | CL 70 | ≥ 70 | ≤ 5 | ≤ 12 | ≤ 2 | - |
| | | | cal hidratada | DL 85 | ≥ 85 | ≥ 30 | ≤ 7 | ≤ 2 | - |
| | | | DL 80 | ≥ 80 | ≥ 5 | ≤ 7 | ≤ 2 | - | |
| | | cal hidráulica HL | HL 2 | - | - | - | ≤ 3 ¹⁾ | ≥ 8 | |
| | | | HL 3,5 | - | - | - | ≤ 3 ¹⁾ | ≥ 6 | |
| | | | HL 5 | - | - | - | ≤ 3 ¹⁾ | ≥ 3 | |
| | | NHL | NHL 2 | - | - | - | ≤ 3 ¹⁾ | ≥ 15 | |
| | | | NHL 3,5 | - | - | - | ≤ 3 ¹⁾ | ≥ 9 | |
| | NHL 5 | | - | - | - | ≤ 3 ¹⁾ | ≥ 3 | | |

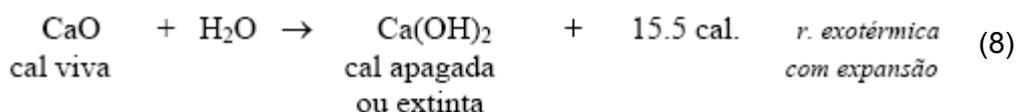
1) Teores de SO₃ superiores a 3% e até 7% são tolerados, se a expansibilidade for confirmada aos 28 dias com cura em água seguindo o ensaio preconizado na EN 196-2;

2) Teores de MgO até 7% são tolerados, se a cal satisfizer o ensaio de expansibilidade indicado na EN 459-2.

Nota: Os valores aplicam-se a todos os tipo de cal. Para cal viva estes valores correspondem aos da condição “como entregue”; para todos os outros tipos de cal (cal hidratada, pasta de cal e cais hidráulicas) os valores baseiam-se no produto isento não só da água livre como também de água combinada.

O produto obtido pela cozedura dos calcários designa-se por cal viva, que é sobretudo óxido de cálcio e que, por reacção com a água (extinção), fornece a cal apagada ou extinta que é sobretudo hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2 . Segundo a normalização europeia uma cal viva designa-se por uma sigla que contem a letra Q e uma cal apagada designa-se por uma sigla quem contem a letra S.

A cal viva apresenta-se sob a forma de grãos de grandes dimensões com 10, 15 ou 20cm – são as pedras (ou blocos) de cal viva [20] ou sob a forma de pó. A cal viva é um produto sólido, de cor branca com grande avidéz pela água. Isto é, para a obtenção e posterior aplicação do hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , é necessário proceder a hidratação da cal viva. A operação chama-se extinção da cal (Equação 8).



A extinção pode fazer-se por dois processos: por imersão ou por aspersão.

A imersão corresponde a extinção da cal viva com excesso de água e é feita mergulhando os blocos de cal viva em água obtendo-se uma pasta – pasta de cal ou pasta de cal apagada que endurece lentamente. De facto é um produto muito pouco poroso, permeável, com difícil e lenta recarbonatação que pode durar mais de 6 semanas, por vezes. Existem argamassas romanas que ainda se encontram moles no seu interior, devido a camada exterior de carbonato de cálcio não deixar penetrar o CO_2 , impedindo assim a recarbonatação em zonas mais profundas.

A aspersão consiste na extinção da cal viva com aspersão de água estritamente necessária a hidratação. Como se verifica a expansão a medida que a cal se vai hidratando, o produto pulveriza-se.

As cais extintas são portanto cais aéreas, principalmente constituídas por hidróxido de cálcio e, magnésio que resultam da extinção da cal viva. As cais extintas não têm reacção exotérmica quando em contacto com a água. São produtos sob a forma de pó seco ou mistura aquosa. Portanto, uma cal aérea (Figura 6) é um ligante constituído sobretudo por hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) que endurece lentamente ao ar por reacção com o dióxido de carbono. Em geral não endurece na água pois não possuem propriedades hidráulicas. Pode-se tratar de uma cal viva ou de uma cal apagada.

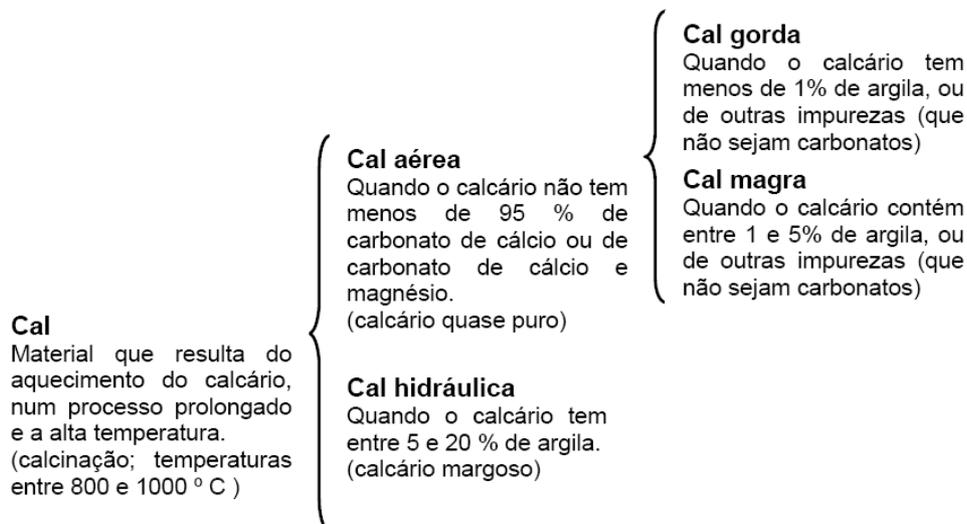


Figura 6 - Esquema da cal [4]

Um dos benefícios do uso da cal aérea esta ligado ao índice de sustentabilidade ambiental, uma vez que recupera o CO₂ emitido na fase de decomposição do calcário (Figura 7).

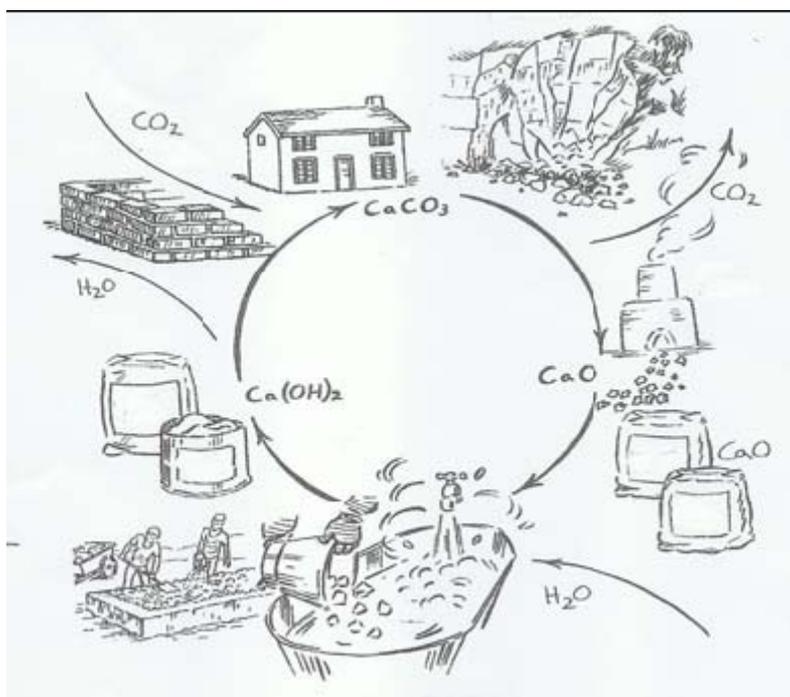
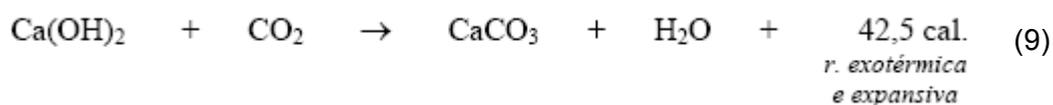


Figura 7 - Cal aérea – ciclo da cal [10]

2.3. Endurecimento da cal aérea

Depois de aplicada, o endurecimento da cal aérea faz-se em duas fases. Numa primeira fase (presa inicial) dá-se a evaporação da humidade em excesso, no final da qual a cal esta firme ao tacto mas ainda é marcavel com a unha. Na segunda fase, a fase de carbonatação, envolve uma reacção química muito lenta, ao ar, em que o hidróxido se reconverte em carbonato de cálcio por recombinação com o dióxido de carbono (CO₂) (Equação 9). A velocidade desta fase de recarbonatação depende da temperatura, da estrutura porosa e da humidade da pasta podendo demorar anos a completar-se [10].



A pasta de cal ao secar retrai e fissa em demasia. Para evitar a retracção de secagem emprega-se areias nas argamassas de cal. Os grão de areia “dividem” o material em pequenas “fracções” localizadas que arejam a argamassa, permitindo a sua carbonatação ao mesmo tempo que se da a secagem. A areia utilizada deve ser siliciosa ou calcarica, bem limpa, isenta de matérias húmicas e de argila.

Tabela 7 - Composição das argamassas [7]

| Argamassa | | Composição | |
|----------------------------------|------------------|---------------------|---|
| Tipo | Ref ^º | Dosagem Volumétrica | Constituintes |
| Cimento (para comparação) | Ci4 | 1:4 | Cimento : areia do rio |
| | Ci4a | 1: (2+2) | Cimento : (areia do rio + areia de Corroios) |
| Cal hidráulica | CH4 | 1:4 | Cal hidráulica natural : areia do rio |
| | CHA3 | 1:3 | Cal hidráulica artificial : areia predominantemente siliciosa com granulometria estudada |
| | CHA3a | 1 : (1,5+1,5) | Cal hidráulica artificial : (areia do rio + areia de Corroios) |
| Bastardas de cal aérea e cimento | CACI3 | 1:3:12 | Cimento branco : cal aérea : areia predominantemente siliciosa com granulometria estudada |
| | CACI1 | 1:1:6 | Cimento : cal aérea : areia do rio |
| Cal aérea | CA3 | 1:3 | Cal aérea em pó : areia predominantemente siliciosa com granulometria estudada |
| | CA3a | 1: (1,5+1,5) | Cal aérea em pó : (areia do rio + areia de Corroios) |
| | CAP | 1:0,5:2,5 | Cal aérea em pó : pozolana : areia predominantemente siliciosa com granulometria estudada |
| | CAF | 1:1,5+1,5 | Cal aérea de fabrico especial (carácter hidrófugo) : areia do rio + areia de Corroios |
| Pré-doseadas | PD-H | - | Argamassa pré-doseada de cal hidráulica artificial |
| | PD-CH | - | Argamassa pré-doseada de cal hidráulica artificial e cal aérea |
| | PD-CA | - | Argamassa pré-doseada de cal aérea |

Tabela 8 - Resultados dos ensaios às características mecânicas das argamassas [7]

| Argamassa | Características mecânicas (MPa) | | | Aderência (MPa) | Comportamento à retracção restringida | | | |
|-----------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| | Rt | Rc | E | | F _{máx} (N) | G (N.mm) | CSAF | CREf (mm) |
| Ci4 | 1,1 Forte demais | 3,2 Forte demais | 6600 Rígido demais | 0,07 (a) Insuficiente | 135 Forte demais | 60 | 1,9 | 0,5 Frágil demais |
| Ci4a | 1,7 Forte demais | 6,9 Forte demais | 9805 Rígido demais | - | 133 Forte demais | 84 | 2,1 | 0,6 Frágil demais |
| CH4 | 0,2 Fraco demais (juntas) | 0,6 | 3025 | 0,12 | 59 | 55 | 1,2 Insuficiente | 0,9 |
| CHA3 | 0,95 Forte demais | 2,60 Forte demais (rebocos) | 7510 Rígido demais | 0,10 | 100 Forte demais | 60 | 2,8* | 0,7 |
| CHA3a | 1,15 Forte demais | 3,10 Forte demais | 7399 Rígido demais | 0,12 | 210 Forte demais | 96 | 1,1 Insuficiente | 0,5 Insuficiente |
| CACI3 | 0,70 | 1,86 | 5671 | 0,12 | 75 | 51 | 2,9 | 0,8 |
| CACI1 | 0,8 | 2,9 Forte demais | 4770 | 0,1 (c+a) | 49 | 58 | 3,0 | 1,2 |
| CA3 | 0,34 | 1,28 | 4098 | 0 Insuficiente | 59 | 73 | 1,4 | 1,2 |
| CA3a | - | - | - | - | 53 | 44 | 2,2 | 0,8 |
| CAP | 0,56 | 2,00 | 4521 | 0,14 | 79 | 61 | 2,2 | 0,8 |
| CAF | 0,24 | 0,63 | 2255 | 0 Insuficiente | 47 | 31 Frágil demais | 2,6 | 0,7 |
| PD-H | 0,84 | 2,54 | 2933 | 0,05 (c) | 47 | 34 Frágil demais | 2,6 | 0,7 |
| PD-CH | 0,40 | 0,98 | 1640 Deformável demais | 0,11 (a) | 68 | 46 | 2,1 | 0,7 |
| PD-CA | 0,63 | 1,5 | 2740 | 0,09 (c+a) | 54 | 27 Frágil demais | 3,8 | 0,6 Frágil demais |

Os aspectos analisados (Tabela 7 a 9) permitem apontar as argamassas com base em cal aérea, com cal aérea como único ligante, aditivada com pozolanas ou em mistura com teores reduzidos de cimento, como as mais adequadas para revestimentos de paredes antigas. Permitem também evidenciar os riscos da hidrofugação em argamassas para esse fim. O estudo cuidadoso das misturas de areias mais apropriadas surge como essencial para melhorar o desempenho de argamassas com base em cal. Por outro lado confirma-se como um caminho a prosseguir o uso de aditivos que confirmam alguma hidraulicidade à argamassa sem prejudicar a capacidade de secagem do suporte.

As argamassas pré-doseadas, de composições muito variáveis, têm que ser estudadas caso a caso, não podendo ser extrapoladas conclusões gerais. No entanto verifica-se que não devem ser aceites de forma acrítica, já que podem apresentar alguns problemas.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios às características de comportamento à água das argamassas [7]

| Argamassa | Comportamento à água | | | | | Envelhecimento artificial acelerado |
|-----------|--|--|------------------------|------------------|--------------------|---|
| | Ensaio clássico | | Ensaio com humidímetro | | | |
| | S _D (m) | C kg/m ² .h ^{1/2} | M (h) | S (h) | H (mv.h) | |
| Ci4 | 0,09 Insuficiente (para reboco exterior) | 12,6 | 0,10 | 120 | 14000 Excessivo | Bom: sem degradação |
| Ci4a | - | 9,3 | - | - | - | Bom: sem degradação |
| CH4 | - | 14,5 Excessivo | - | - | - | - |
| CHA3 | 0,075 | 10,1 | 0,50 | 38 | 8639 | Médio: descolagem nos ciclos água/gelo |
| CHA3a | 0,075 | 14,7 Excessivo | 0,50 | 72 | 15228 | Médio: descolagem nos ciclos água/gelo |
| CACi3 | 0,050 | 9,5 | 0,17 | 38 | 7408 | Bom: sem degradação |
| CACi1 | 0,10 | 14,2 Excessivo | 0,10 | 90 | 10870 | Bom: sem degradação |
| CA3 | 0,050 | 10,1 | 0,17 | 30 | 9244 | Mau: descolagem e queda nos ciclos calor/frio |
| CA3a | - | - | 0,10 | 96 | - | Médio: degradação nos ciclos água/gelo |
| CAP | 0,035 | 9,5 | 0,17 | 34 | 7923 | Médio: degradação nos ciclos água/gelo |
| CAF | 0,075 | 0,27 Insuficiente | * | * | * | Bom: sem degradação |
| PD-H | 0,070 | 7,5 | 0,50 | 81 | 20827 Excessivo | Bom: sem degradação |
| PD-CH | 0,07 | 0,68 Insuficiente | 0,60 | 560 Excessivo | 49790 Excessivo | - |
| PD-CA | 0,06 | 1,93 Insuficiente | 0,75 | 450 Excessivo | 36720 Excessivo | - |

Vários aspectos de grande importância ficaram mal esclarecidos ou por analisar. Assim, como se refere, é importante identificar e determinar os teores de sais solúveis dos vários tipos de argamassas, bem como o seu grau de perigosidade para as paredes antigas. Outras eventuais interacções químicas entre argamassas e alvenarias devem, também, ser tidas em consideração. Estes aspectos podem ser condicionantes e, tanto quanto se sabe actualmente, parecem desaconselhar desde já o uso do cimento Portland. O estudo da durabilidade face às acções climáticas não foi conclusivo [7].

2.4. Materiais pozolânicos

2.4.1. Definição

Materiais pozolânicos são definidos como aqueles que possuem em sua composição silicatos ou sílico-aluminatos amorfos com nenhuma ou pouca actividade aglomerante, mas que quando em contacto com a água e em temperatura ambiente reagem com o hidróxido de cálcio formando componentes com propriedades ligantes [10].

2.4.2. Classificação de materiais pozolânicos

As pozolânas, quanto à origem, são classificadas em dois grupos, naturais e artificiais (Figura 8 a 11, Tabela 10). As pozolânas naturais são aquelas encontradas na natureza, fazendo parte desse grupo alguns materiais de origem vulcânica e também terras diatomáceas. Já as pozolânas artificiais são as que sofreram algum tratamento térmico como argilas e determinadas rochas que contém sílica, ou as provenientes dos subprodutos de actividades industriais e agro-industriais, sendo exemplificados pela cinza volante, cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar [15].

A norma divide as pozolânas em três classes diferentes: Classe N, Classe F e Classe C. A Classe N engloba pozolânas naturais (calcinadas ou não) tais como algumas terras diatomáceas, opala e sílex, tufos e cinzas vulcânicas ou pumitos (calcinados ou não) e vários materiais que necessitam de calcinação de forma a induzir propriedades satisfatórias, assim como algumas argilas e xistos. As Classes F e C são ambas relativas a cinzas volantes, englobando a Classe F cinzas produzidas a partir de antracite queimada ou carvão e a Classe C cinzas produzidas a partir de lignite ou carvão sub-betuminoso. Os materiais da Classe C têm algumas propriedades hidráulicas. Para se inserirem em cada uma das referidas classes os materiais devem adicionalmente cumprir os demais requisitos definidos na norma quanto às suas características [16].

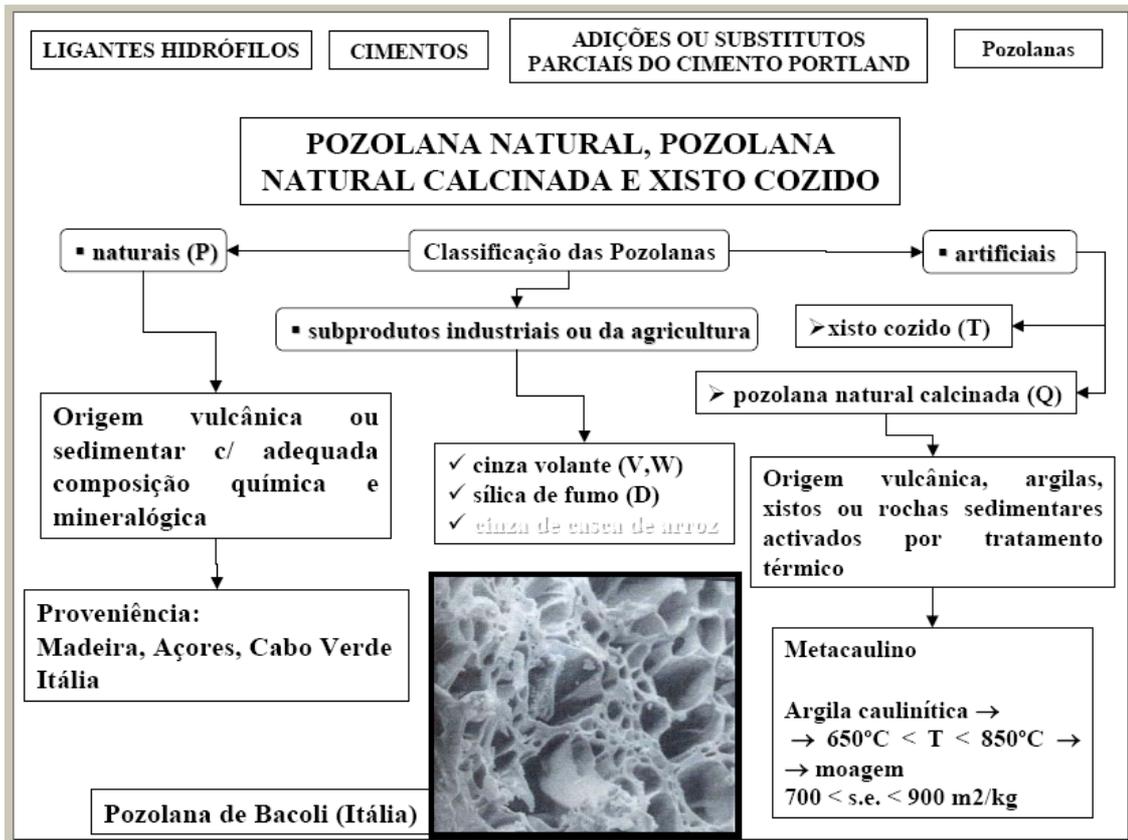


Figura 8 – Classificação de materiais pozolânicos [17]

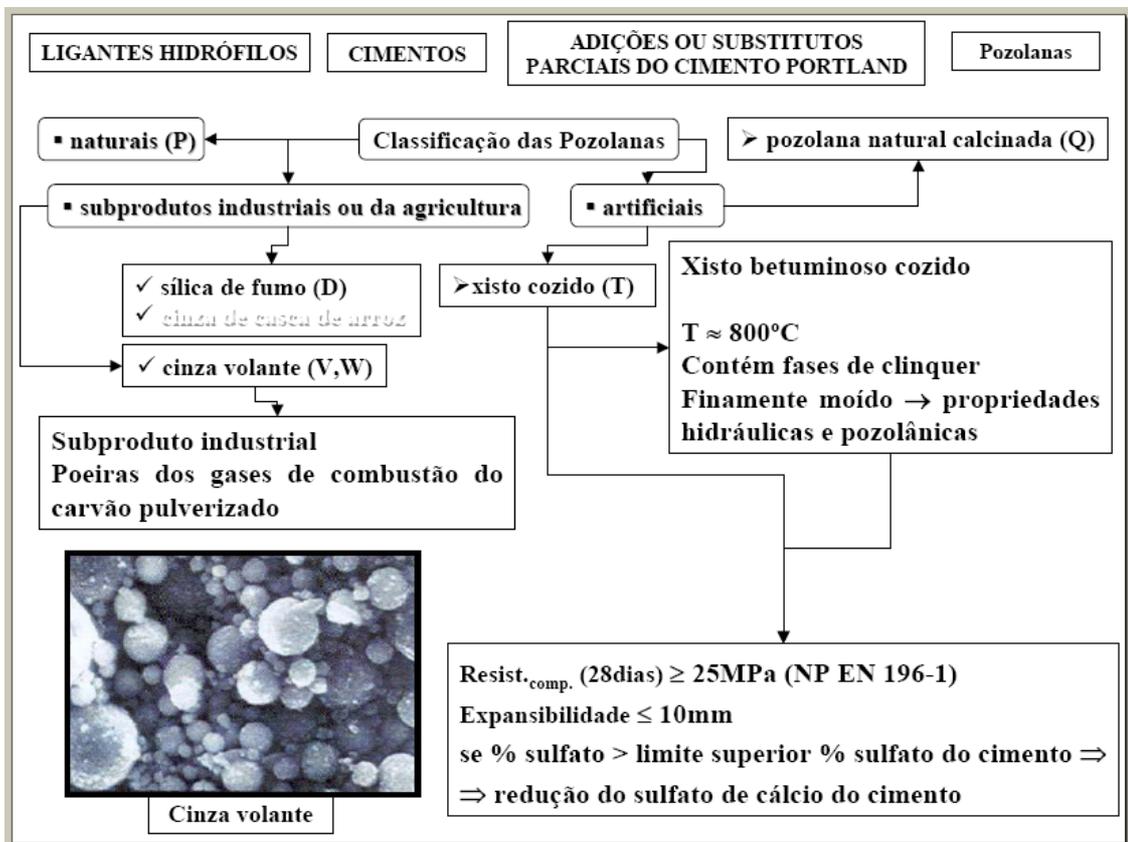


Figura 9 - Classificação de materiais pozolânicos [17]

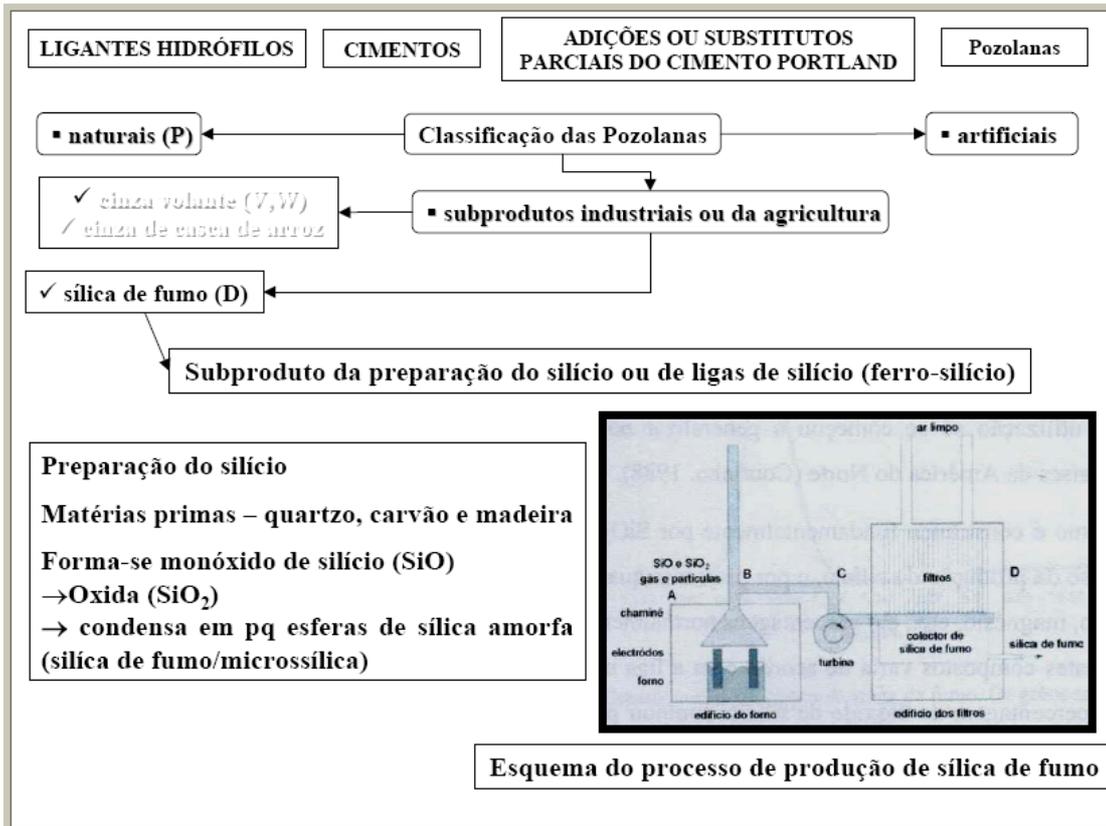


Figura 10 - Classificação de materiais pozolânicos [17]

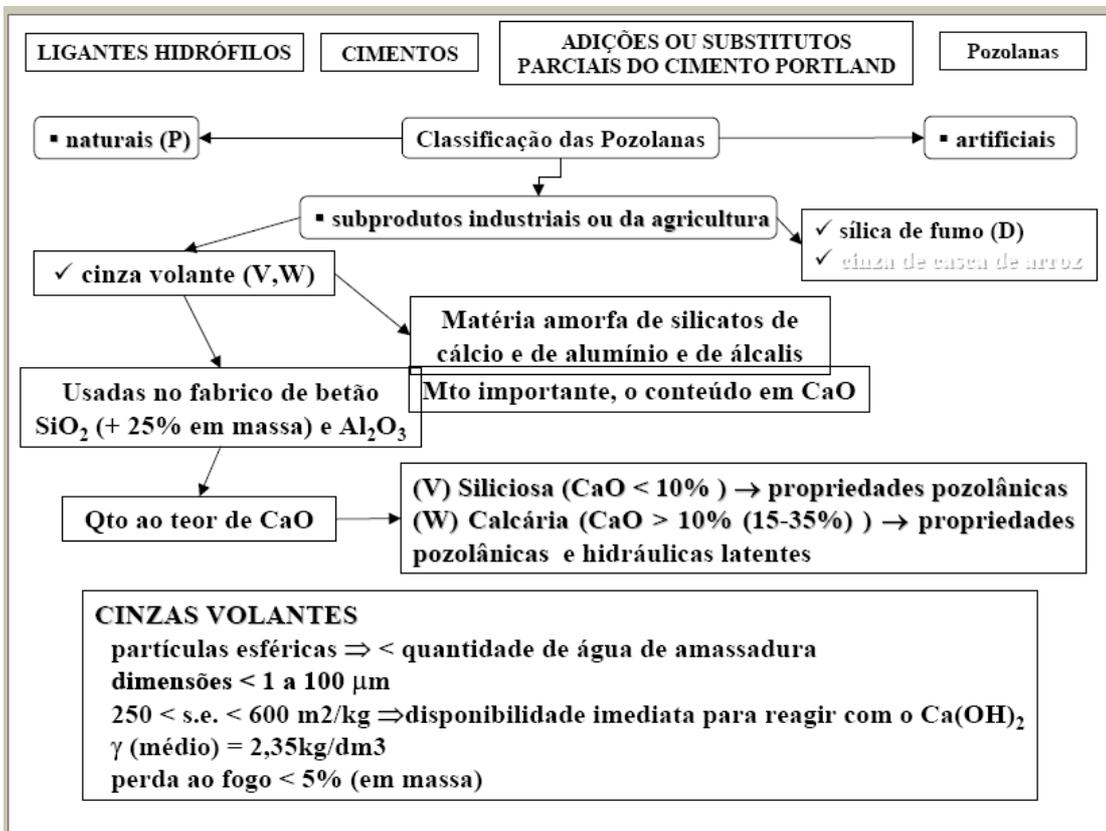


Figura 11 - Classificação de materiais pozolânicos [17]

Tabela 10 - Classificação dos materiais pozolânicos quanto à origem [10]

| Pozolana Natural | Pozolana Artificial |
|--|---|
| Rochas vulcânicas ácidas | Escórias ácidas de alto forno |
| Tufos vulcânicos | Cinzas volantes |
| Terras diatomáceas | Resíduos argilosos de folhelhos betuminosos após extração |
| Arenitos e folhelhos opalinos | Microssílica |
| Argilitos de argilas mal cristalizadas | Argilas calcinadas (metacaulinita) |

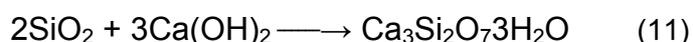
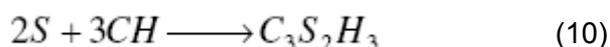
2.4.3. Reacção pozolânica

Os processos reactivos (Figura 31 e Figura 32) associados com a hidratação do cimento Portland estão hoje praticamente identificados. [18] Eles envolvem, basicamente, a formação de silicatos hidratados de cálcio $[(CaO)_3(SiO_2)_2(H_2O)_3]$ e hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$. Outras reacções complementares incluem a formação de etringite (tri-sulfo-aluminato de cálcio) em presença do sulfato de cálcio, bem como vários aluminatos de cálcio hidratados.

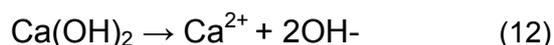
O principal produto da reacção entre a pozolâna e o hidróxido de cálcio é o silicato de cálcio hidratado, podendo também haver a formação de aluminatos de cálcio hidratado.

A precipitação do C-S-H ocorre pela dissolução da pozolâna em meio alcalino com sua combinação com os íons Ca^{2+} presentes em solução.

A reacção entre a sílica activa e o hidróxido de cálcio, de uma forma simplificada, é mostrada na equação seguinte [10]:



Hidrólise do hidróxido de cálcio faz-se de acordo com:

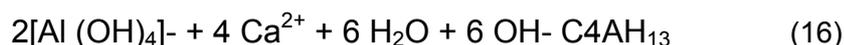


As pozolânas, constituídas fundamentalmente por matéria vítrea silicosa ou aluminosa, são despolimerizadas conforme as equações seguintes [10]:





Reacção entre os iões Ca^{2+} e os mono-silicatos e aluminatos [10]:



Os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, denominados como CSH ou CAH, apresentam-se sob diversas formas, dependendo da relação Ca/Si e das condições de formação. Este processo hidráulico reforça a etapa de endurecimento das argamassas com pozolanas.

As pozolâneas, e em geral todos os materiais com comportamento pozolânico, são muitas vezes adicionados ao cimento com o objectivo de se combinarem com o hidróxido de cálcio, o componente mais fraco que se forma da hidratação do cimento, dando origem a geles silicatados do tipo C-S-H, que são, como se sabe, os principais componentes responsáveis pelo desempenho mecânico da matriz cimentícia. Assim, as adições pozolânicas concorrem para o ganho da resistência mecânica. Acresce ainda que o produto final assume maior durabilidade, menor retracção e mais baixo calor de hidratação [18].

As reacções pozolânicas são normalmente aceleradas com o aumento da temperatura (Figura 12), embora a temperatura ambiente se desenvolva mais lentamente que as reacções de hidratação do cimento. Na síntese dos geopolímeros, as pozolâneas ou materiais com propriedades pozolânicas, são usadas como reagentes principais, mas o desenvolvimento da reacção é completamente diferente. De facto não se procura a reacção com o hidróxido de cálcio, que em principio não esta presente, mas sim a interacção do material pozolânico, constituído por alumino-silicatos, com um meio fortemente alcalino especificamente em soluções aquosas de poli-silicatos. Dito de outro modo não há reacção pozolânica nos geopolímeros, nem muito menos substituição parcial de cimento Portland por adições pozolânicas. Nos geopolímeros não há, em principio, qualquer intervenção do cimento Portland e é o material pozolânico que é activado alcalinamente dando lugar a formação de geopolímeros. Os materiais pozolânicos são assim um componente essencial da reacção de geopolimerização.

Os efeitos benéficos da utilização de pozolâneas em betões não se limitam à reacção pozolânica .

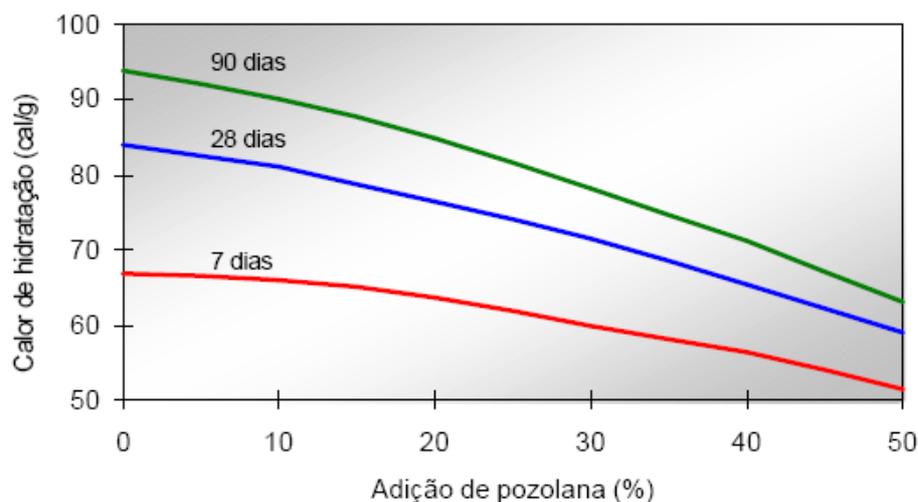


Figura 12 - Efeito do teor de pozolana na taxa de calor de hidratação [18]

Existe também um efeito físico que advém da capacidade das pequenas partículas deste material se posicionarem nos vazios entre partículas de cimentos, quando elas estão bem defloculadas na presença de superplastificante, e na interface agregado-pasta. Este efeito é conhecido como efeito microfíler.

A incorporação de materiais finamente divididos geralmente aumenta a trabalhabilidade do betão fresco, por reduzir o tamanho e o volume de vazios. Este refinamento dos poros, reduz a permeabilidade do betão e, aliado a redução de sua alcalinidade, contribui para a durabilidade da estrutura, principalmente quando exposta a ataques químicos.

O controlo da expansão álcali-agregado no betão está ilustrado na Figura 13, onde vários teores de pozolâna foram adicionados ao betão, utilizando diferentes aditivos minerais em substituição parcial do cimento Portland, afirmam que altos níveis de substituição por cinza volante reduzem significativamente a expansão, enquanto que, para elevados teores de escória de alto-forno no betão, a reacção álcali-agregado é praticamente inexistente.

Algumas normas, recomendações e especificações ditam parâmetros físicos, químicos ou mecânicos com o intuito de assegurar que o material seja qualificado como pozolânico. Diversos estudos apresentam severas críticas em relação a essas exigências, pois são restritivas e inibidoras, devido a falta de correlação entre as características fixadas e as propriedades desejadas para o betão. Para tais autores, os valores impostos para a soma dos óxidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) não garantem que a pozolâna irá desenvolver propriedades cimentares.

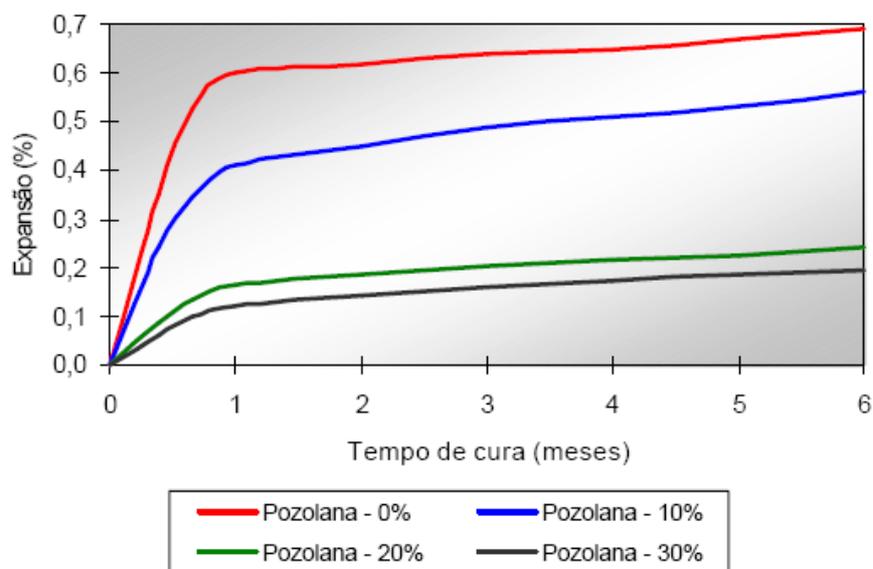


Figura 13 - Controlo da expansão álcali-agregado pelo uso de pozolâna no betão [18].

Por outro lado, há um consenso entre os pesquisadores sobre o fato do desempenho dos aditivos minerais estar ligado a sua reactividade, isto é, ao teor de material amorfo, e principalmente a finura. O aumento da quantidade de partículas finas (aumento da superfície específica) desempenha um papel preponderante mediante o efeito de nucleação das partículas de cimento, propiciando maior quantidade de locais para hidratação dos compostos.

A pozolâna, para desenvolver compostos com actividades cimentares, deverá ser moída até obter uma superfície específica maior do que a do clínquer, considerando o resíduo na peneira de 45 μ m como o parâmetro mais importante a ser analisado durante a avaliação de uma pozolâna.

A influência da finura da pozolâna tem sido reportada em vários artigos específicos; tal comportamento é todavia bastante previsível, uma vez que ao se incrementar a finura tem-se conseqüentemente um aumento da área de reacção do material.

Para utilização em betão de alto desempenho a uniformidade e a compatibilidade com outros aditivos devem ser verificadas, para assegurar o máximo desempenho. Há uma tendência actual em conjugar os efeitos benéficos e específicos de diferentes aditivos minerais para incrementar as propriedades do betão e sua durabilidade. Ao empregar a sílica activa em conjunto com a cinza volante, por exemplo, aglutina-se a alta reactividade da primeira com a melhoria que o segundo proporciona na reologia do betão fresco.

2.4.4. Metacaulino

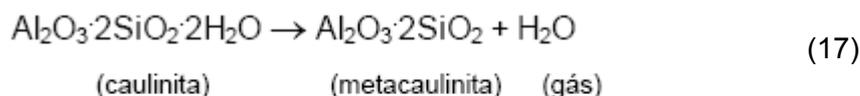
De todos os materiais argilosos, os caulínicos [18] são aqueles amplamente utilizados para a obtenção de pozolânas. Inúmeros são os trabalhos de pesquisa sobre o potencial e a influência em betões e argamassas o metacaulino [22] (caulino calcinado) (Figura 14). Estudos realizados apontaram para a elevada actividade pozolânica e excelente potencial de utilização do metacaulino como aditivo mineral para a produção de betões de alto desempenho, com resultados similares aos obtidos em betões com sílica activa.

A desidroxilação da caulinite ocorre conforme a equação (17), em torno de 500°C-600°C. A fase metacaulinita, contendo sílica e alumina em elevado estado de desordem é responsável pela actividade química. Obtêm-se geralmente por calcinação a temperaturas entre 700°C-900°C, havendo uma persistência na queima para temperaturas acima de 900°C ocorre formação de novos compostos cristalinos estáveis, de menor superfície específica, ocasionando, portanto, uma queda considerável na actividade da pozolâna.



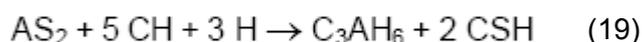
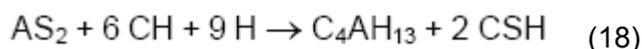
Figura 14 – Metacaulino [10]

A calcinação das argilas caulínicas ou outras (ilites, etc) é responsável pela actividade pozolânica devido a formação de metacaulinite.



(Representação abreviada: $\text{AS}_2\text{H}_2 \rightarrow \text{AS}_2 + \text{H}$)

A substituição parcial de cimento Portland por metacaulinite ocasiona, devido ao efeito microfíler, um acréscimo imediato na resistência do betão, já verificado nas primeiras 24 horas, e um efeito posterior devido à acção pozolânica, que atinge o seu máximo entre 7 e 14 dias. Além do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), os principais produtos hidratados formados, à temperatura ambiente, pelas reacções pozolânicas da metacaulinite são os seguintes :



Em alguns casos, desde que haja disponibilidade de SO_3 , podem-se formar ainda etringite e monossulfoaluminato de cálcio [19].

Estudos realizados, com quatro diferentes tipos de metacaulino, além de sílica activa, em substituição parcial de 15% da massa de cimento, em argamassas de alto desempenho, revelaram a influência da finura do aditivo na resistência à compressão. A Figura 15 ilustra os resultados obtidos, onde se observa que, nas idades iniciais, as argamassas contendo os metacaulinos de maior superfície específica, apresentam valores de resistência superiores aos obtidos para as argamassas de referência e contendo sílica activa [20].

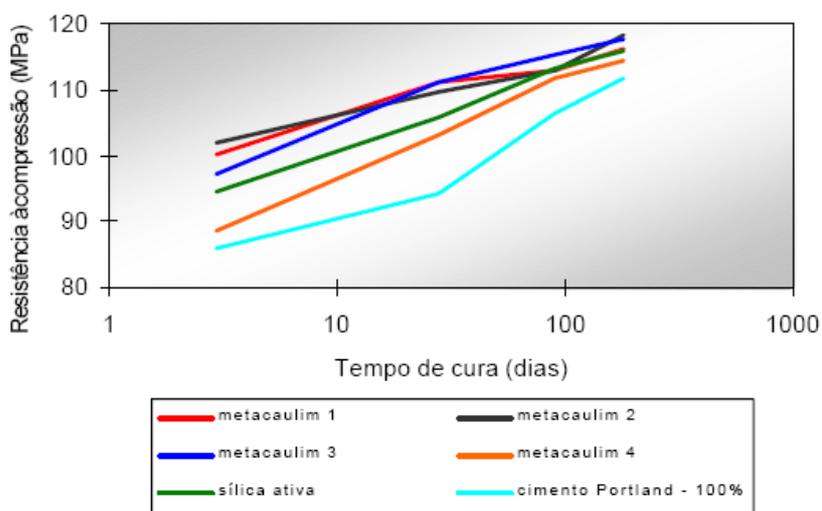


Figura 15 - Resistência à compressão de argamassas contendo metacaulino e sílica activa [18]

Mesmo para idades avançadas, as amostras com metacaulino e sílica activa apresentam valores de resistência similares [21].

A Figura 16 evidencia um aspecto importante de misturas de cimento Portland e metacaulinita: o efeito de aceleração das reacções de hidratação [23].

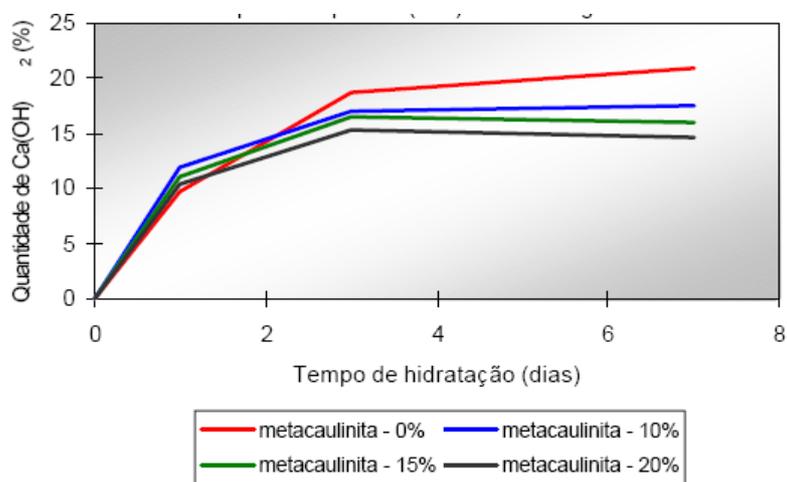


Figura 16 - Evolução do hidróxido de cálcio com o tempo de hidratação [18]

Este efeito ocorre devido à acção dispersante desta pozolâna sobre as partículas de cimento, actuando, desta forma, como um agente de nucleação na matriz cimentícia. O rápido consumo de hidróxido de cálcio pela metacaulinita, realizado no período inicial de hidratação, densifica a matriz cimentícia limitando a mobilidade iónica necessária às reacções pozolânicas, que poderiam gerar um incremento maior de resistência em idades elevadas [23].

Há uma grande eficácia do metacaulino no controlo da expansão proporcionada pela reacção álcali-sílica no betão.

Observa-se que, com substituições de 15% a 20% de cimento por metacaulino, há uma redução significativa nas concentrações dos íons OH^- , Na^+ , e K^+ na solução dos poros do betão, contribuindo para a diminuição do pH da solução. A Figura 17 apresenta a evolução da expansão de prismas de betão (75 mm x 75 mm x 300 mm) contendo metacaulino, cimento Portland e agregado de calcário altamente reactivo. [24]

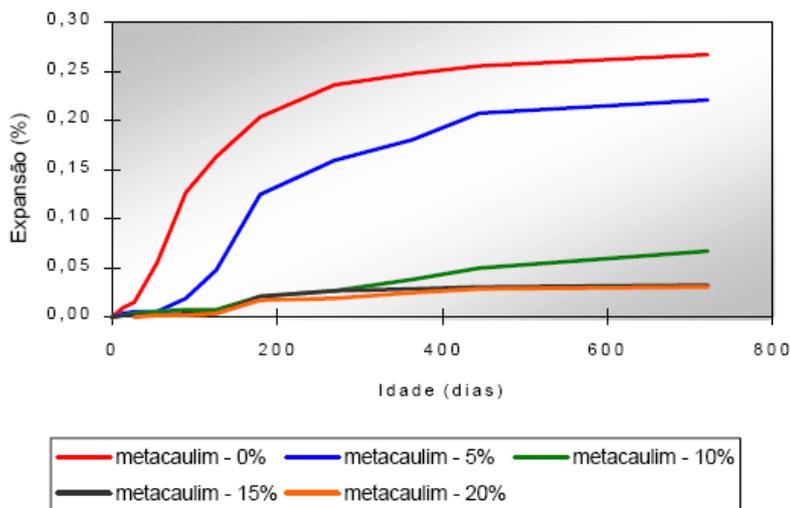


Figura 17 - Evolução da expansão de prismas de betão contendo metacaulino [18]

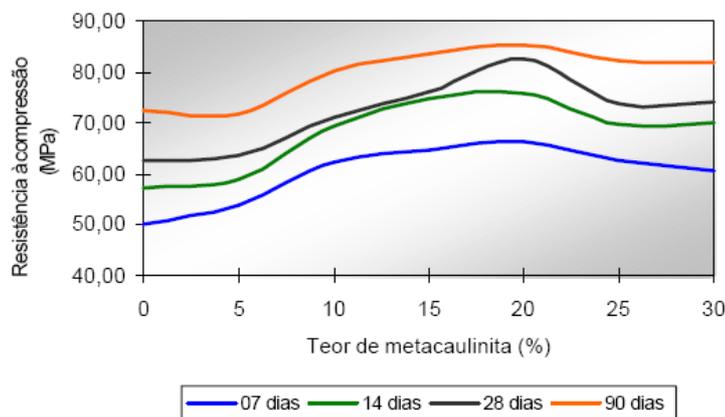


Figura 18 - Resistência à compressão de betões com metacaulino [18]

A temperatura óptima de activação depende das características da argila utilizada como matéria-prima. A faixa ideal é a compreendida entre 650°C e 800°C. O teor de substituição também influencia as propriedades do betão. Utilizando 20% de substituição de cimento por metacaulino como um patamar acima do qual a resistência diminui para todas as idades ensaiadas (Figura 18) [25].

Mesmo com todas as melhorias provenientes do uso do metacaulino em betões e argamassas, a sua utilização não é tão frequente quando comparada com outras pozolâneas, como sílica activa e cinza volante. Tal facto deve-se ao alto custo relativo de processamento deste aditivo. O crescente uso de resíduos da indústria cerâmica poderá vir a mudar este quadro, já que trariam uma substancial redução no custo.

2.4.5. Diatomites

As diatomáceas (Figura 19 a 21) são elementos unicelulares microscópicos que estão no limite entre o reino animal e o reino vegetal. Apresentam paredes celulares siliciosas, designadas por frústulos. São muito apreciadas pela beleza das suas formas geométricas e cores variadas, existindo uma gama enorme de padrões. Ao longo dos séculos, a acumulação de frústulos deu origem a rochas sedimentares conhecidas vulgarmente por diatomites, farinha fóssil ou terra de radiolárias [24].

Elas são também denominadas como *Kieselguhr* (Alemanha), *Moler* (Dinamarca), *Trípoli* (Rússia) e *Gais* (França), as quais constituem um grupo de pozolânas caracterizadas por materiais de origem organogênica.

As diatomáceas são organismos fotossintetizadores que se revestem de uma carapaça ou frústula de sílica não cristalina; vivem numa grande variedade de ambientes aquáticos, desde o de águas doces ou salobras até os de regiões francamente marinhas. Muitas espécies não estão restritas somente a certos ambientes, caracterizados por determinada temperatura e propriedades químicas, como salinidade e pH, mas também a seus respectivos modos de vida ou hábito.

Embora, no tempo, o registo ocorra do Pré-Cambriano ao Recente, preservam-se somente os depósitos recentes em face da influência destrutiva que factores diagenéticos e metamórficos exercem sobre as microestruturas. A formação de depósitos de diatomites depende da existência de condições ambientais propícias num período de tempo adequado para permitir uma acumulação significativa de frústulas silicosas. A sedimentação, no fundo dos lagos, das frústulas de diatomáceas mortas dá origem a depósitos minerais, os quais podem ser constituídos, quase que exclusivamente, tanto por frústulas silicosas como por uma mistura delas com argila, principalmente caulínicas [25]. O diatomito ou esponjilito é uma rocha de aspecto pulverulento, leve, composta de carapaças de algas microscópicas ou frústulas de esponjiários, que variam de 10 a 500 micra, cuja estrutura é de sílica amorfa hidratada. Incluem ainda, pequenas quantidades de substâncias inorgânicas como alumina, ferro e metais alcalinos, quantidades variáveis de matéria orgânica e componentes comuns de litologias sedimentares como, por exemplo, areia, silte e argila [26].

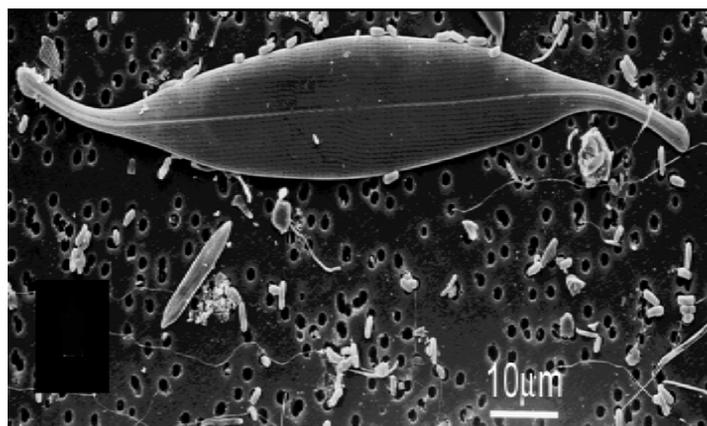


Figura 19 - *Gyrosigma fasciola* [23]

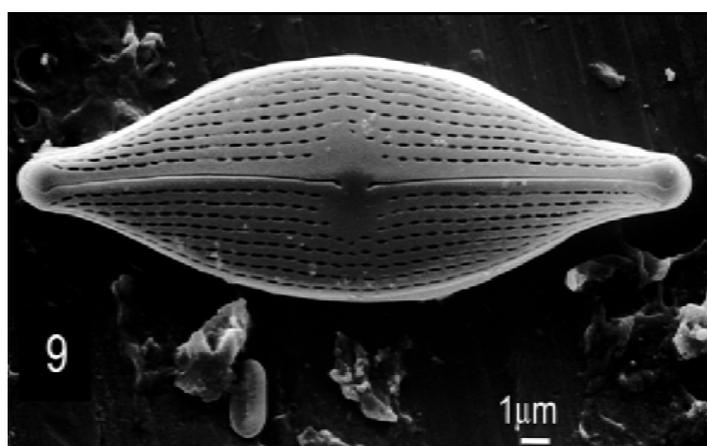


Figura 20 – *Navicula gregária* [23]

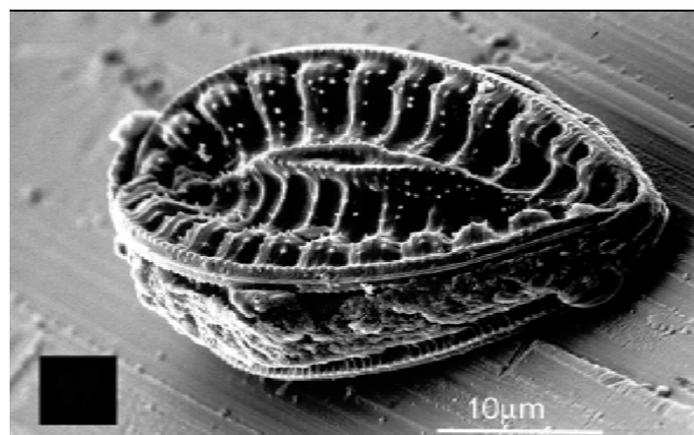


Figura 21 - *Surirella cf. brightwellii* [23]

Elas podem ser aplicadas para as mais diversas finalidades, as quais, incluem:

- a) Filtração industrial;
- b) Isolante térmico e acústico;

- c) Catalisadores;
- d) Absorventes;
- e) Cargas;
- f) Abrasivos;
- g) Indústria farmacêutica;
- h) Indicadores estratigráficos;
- i) Indústria química;
- j) Materiais de construção;
- l) Pozolânas.

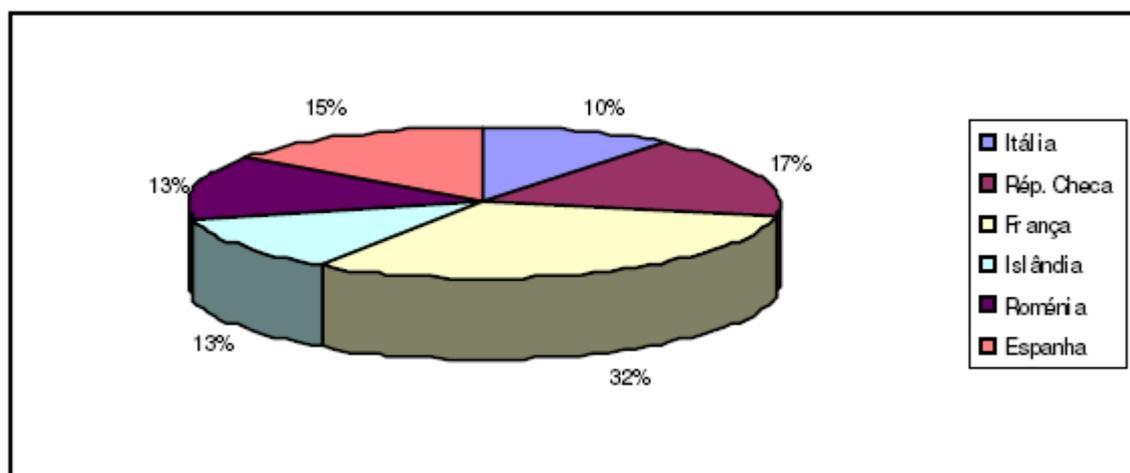


Figura 22 - Principais produtores mundiais de diatomites [10]

Das aplicações mencionadas, as terras diatomáceas podem ser utilizadas como pozolânas naturais, devido às suas características físicas e químicas. Dependendo do próprio grau de pureza, dada pela percentagem de frústulas, elas podem ser misturadas directamente ao cimento, em substituição a uma parcela do clínquer Portland, ou então, adicionadas após tratamento térmico [9].

Esses materiais são altamente reactivos à cal, mas sua microestrutura (angulosidade e alta porosidade) é responsável por um consumo elevado de água, prejudicial à resistência e durabilidade do betão. Além disso, depósitos de diatomites, tais como o *Moler* da Dinamarca, contêm geralmente grandes quantidades de argila, silte e areia fina, e, por isso, devem ser termicamente activadas antes de serem empregadas com o propósito de aumentar a actividade pozolânica.

É preciso ressaltar, contudo, que além das aplicações industriais das terras diatomáceas, há também aplicações na fabricação artesanal de tijolos cerâmicos.

Segundo estas mesmas fontes, Portugal produziu 400 toneladas de diatomito anualmente na sua exploração situada em Óbidos. As restantes explorações (Rio Maior, Tomar, Sesimbra) encontram-se encerradas [9].

Alguns depósitos (Figura 22) (a norte de Roma, em Oita no Japão) são compostos por materiais de origem diversa (vulcânica, sedimentar e orgânica) formando rochas híbridas procedentes da mistura de materiais de diferentes origens (rochas vulcânicas, diatomitos) em água, seguida de ataque ácido. Apresenta-se a composição química de dois diatomites estudadas no LNEC por Sousa Coutinho (Tabela 11) [9].

Tabela 11 - Composição química de diatomites comerciais (%) [10]

| Diatomite | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | P.R. |
|-----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|-------|
| 1 | 71.51 | 13.19 | 3.99 | 6.28 | 4.14 | Vest. | 12.41 |
| 2 | 87.43 | 5.04 | 0.76 | 8.10 | 3.45 | 0.49 | 15.11 |

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

- 3.1. Materiais utilizados
- 3.2. Determinação da reactividade pozolânica dos aditivos
- 3.3. Formulação de argamassas
- 3.4. Execução e ensaios de consolidação das argamassas

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O objectivo deste trabalho é avaliar a reacção pozolânica de metacaulinos e diatomites em argamassas de reabilitação de edifícios e verificar os benefícios em termos das características finais dessas argamassas.

Numa primeira fase serão realizadas composições de argamassas de cal aérea como ligante e contendo uma areia siliciosa como agregado. Numa segunda fase, serão introduzidos nestas argamassas teores diferentes de Metacaulino e Diatomites.

A verificação da reactividade pozolânica destes dois aditivos será avaliada.

Os ensaios a realizar serão tanto no estado fresco das composições como no estado endurecido.

3.1. Materiais utilizados

3.1.1. Agregados

Nas argamassas preparadas o agregado utilizado é a areia siliciosa com uma distribuição granulométrica dada na Figura 23 e Tabela 12 efectuada por peneiração (NP EN 1015-1).

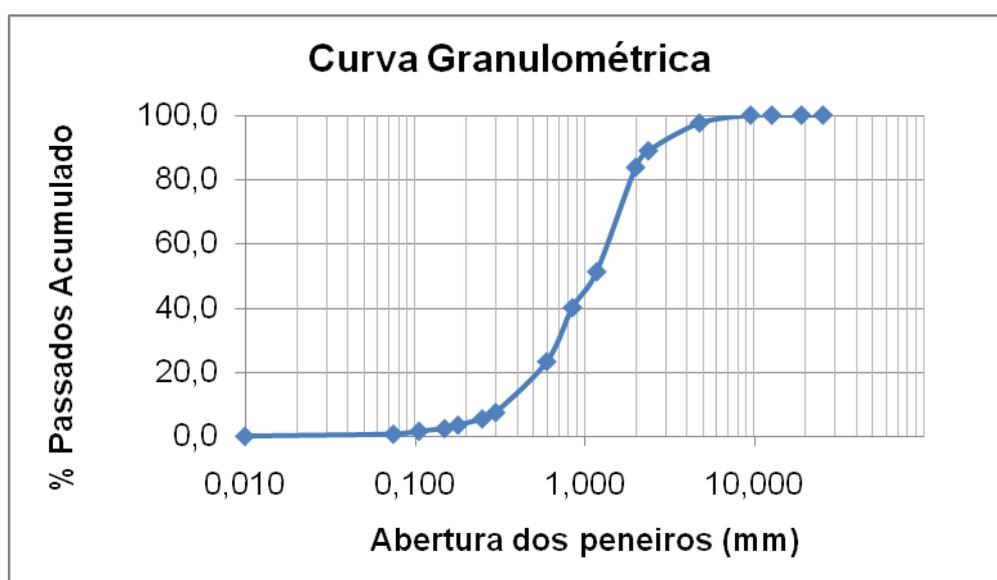


Figura 23 – Curva granulométrica da areia utilizada

Tabela 12 - Distribuição granulométrica da areia utilizada

| Peneiros (ASTM) | | Massa retida | Retido | Retido Acumulado | Passado Acumulado |
|-----------------|---------------|--------------|--------|------------------|-------------------|
| n.º | Abertura (mm) | (g) | % | % | % |
| 4 | 4,760 | 12,30 | 3,1 | 0,000 | 100,000 |
| 8 | 2,380 | 43,14 | 11,0 | 1,640 | 98,360 |
| 16 | 1,190 | 162,15 | 41,2 | 8,854 | 91,146 |
| 30 | 0,600 | 83,87 | 21,3 | 32,154 | 67,846 |
| 50 | 0,300 | 79,14 | 20,1 | 83,604 | 16,396 |
| 100 | 0,149 | 5,35 | 1,4 | 99,004 | 0,996 |
| 200 | 0,075 | 4,50 | 1,1 | 99,700 | 0,300 |
| <200 | 0,01 | 3,20 | 0,8 | 100,000 | 0,000 |
| Total | | 393,65 | 100,0 | | |

A densidade de areia utilizada foi determinada através da determinação do peso de um volume conhecido, dividindo pelo peso do volume conhecido de água, tendo resultado um valor de 1,55 g/cm³

3.1.2. Ligantes e adições

Para a formulação das argamassas de reabilitação em edifícios foram utilizados como ligantes, a cal aérea (Iusical H100) e ainda utilizados como adições Metacaulino e Diatomite (Farina Fossil – 30A). A caracterização dos aditivos envolveu a determinação da densidade (Tabela 13). As características físicas e químicas da Diatomite (Tabela 14). Aos aditivos efectuou-se também a determinação da reactividade pozolânica, pelo método explicitado na secção 3.4.

Tabela 13 - Densidades aparentes dos ligantes e agregados da cal aérea

| | Cal Aérea | Diatomite | Metacaulino |
|-------------------------------|-----------|-----------|-------------|
| Densidade (g/m ³) | 0,53 | 0,28 | 0,60 |

Tabela 14 - Características da diatomite

| Terra natural Diatomite | |
|--------------------------------|------------------------|
| Análise química | |
| SiO ₂ | 83,00% |
| Al ₂ O ₃ | 0,80% |
| CaO | 5,00% |
| Fe ₂ O ₃ | 0,40% |
| MgO | 0,40% |
| Loss on ignition | 10,00% |
| Propriedades físicas | |
| Cor | Branco |
| Densidade | 0,180gr/cc. |
| Humidade | <4 % |
| Área superficial | 10 m ² /gr. |
| pH | 8,5 |
| Absorção de azeite | 125 gr/100gr. |
| Granulometria | |
| Retido a 45 micras | <0,20 % |
| Diâmetro médio | 12 microns |

3.2. Determinação da reactividade pozolânica dos aditivos

3.2.1. Princípio

A pozolânicidade é avaliada comparando a concentração de ião cálcio, expresso como óxido de cálcio, presente na solução aquosa em contacto com o cimento hidratado, depois de um período fixo de tempo, com uma quantidade de ião cálcio capaz de saturação uma solução com a mesma alcalinidade.

O princípio inerente a este ensaio é que a actividade pozolânica consiste na fixação de hidróxido de cálcio pela pozolâna tal que quanto mais baixa for a concentração final daquele hidróxido, mais elevada será a pozolânicidade.

3.2.2.Reagentes

- (1) Ácido clorídrico concentrado (HCL), ($\rho=1,18\text{g/cm}^3$).
- (2) Acido clorídrico diluído, cerca de 0,1 mol/l, preparado adicionando cerca de 8,5 ml de ácido clorídrico concentrado, medindo usando uma bureta de 50 ml, para um frasco volumétrico de 1 litro, contendo 500 ml de água, depois encher ate perfazer 1 litro de água.
- (3) Acido clorídrico diluído, (1+2), preparado adicionando 250 ml de ácido clorídrico concentrado e 500 ml de água.
- (4) Alaranjado de metil.
- (5) Hidróxido de sódio (NaOH).
- (6) Indicador de Alaranjado de metil, preparado dissolvendo (0,020 \pm 0,002) g de alaranjado de metil em água ate perfazer 1000ml.
- (7) Solução de hidróxido de sódio, preparado dissolvendo (100 \pm 1) g de hidróxido de sódio, em água e perfazer 1000ml.
- (8) Carbonato de cálcio (CaCO₃).
- (9) Cloreto de sódio (NaCl).
- (10) Murexide
- (11) Indicador de murexide, preparado moendo (1,0 \pm 0,1) g de murexide com (100 \pm 1) g de cloreto de sódio.
- (12) EDTA
- (13) Solução de EDTA, cerca de 0,03 mol/l, preparado dissolvendo (11,17 \pm 0,01) g de EDTA em água, perfazendo 1000ml. Armazena-lo num frasco de polietileno vedado.
- (14) Indicador de calcon
- (15) Carbonato de sodio (Na₂CO₃)

3.2.3. Aparelhos

- 2 Funis de caule
- 1 Funil de Büchner
- Papel de filtro
- Frascos de polietileno de 250 ml
- Frascos com bico de 250 ml a 400 ml
- 2 Pipetas de 50 ml
- 2 Pipetas de 25 ml e 50 ml, com balão
- Bureta de 50 ml
- 4 Frascos de 500 ml e 1000 ml
- 4 Frascos cónicos de 250 ml
- 2 Frascos de 50 ml e 100 ml
- PH Meter
- Balança
- Placa de aquecimento
- 2 Vidro relógio
- 2 Varetas de vidro

3.2.4. Procedimento de ensaio

3.2.4.1. Preparação das amostras com cimento e aditivos

A norma NP EN 196-5 propõe um ensaio para determinação da pozolânicidade de cimentos pozolânicos que é indicado para pozolânas na mistura de 75% de cimento portland tipo I da classe 42,5 e 25% de pozolâna, pela norma NP 4220 (1993).

Utilizou-se 100g de cimento, peneiro-se num peneiro de 150 μm (Figura 24), e pesou-se, nas percentagens indicadas e para 20 ± 2 gramas de amostra, 75% de cimento e 25% de pozolâna (metacaulino e diatomite). Foi pesado duas amostras com metacaulino e outras duas com diatomite.



Figura 24 - Peneiro de 150 µm

Colocou-se estas amostras em frascos de polietileno de 250 ml (Figura 25), de seguida misturou-se as amostras para ficar homogéneo. Retirou-se as amostras dos frasco de polietileno, pipetou-se 100 ml de agua previamente fervida, para o frasco de polietileno, selou-se o frasco. Colocou-se os frascos em temperatura uniforme de 40° C (Figura 26), cerca de 1 hora. Removeu-se os frascos de temperatura uniforme. Colocou-se 20g de amostras em percentagens já mencionadas, nos frascos com um funil com caule. Imediatamente selei os frascos a medida que ia colocando as amostras.



Figura 25 - Frasco de polietileno



Figura 26 - Estufa utilizada

Misturou-se vigorosamente cerca de 20 s, para evitar o aparecimento de caroços. Repor os frascos, em temperatura uniforme, verificando que a base dos frascos se posicionam na horizontal, para que a camada de depósito tenha uma espessura uniforme. Efectuou-se todas estas operações o mais rapidamente possível, para evitar o contacto a temperatura ambiente.

Passado um período de 15 dias de temperatura uniforme, removeram-se os frascos da estufa, e filtrou-se a solução imediatamente, através de um funil de Büchner, num frasco de vácuo, utilizando papel de filtro, em menos de 30 s.

3.2.5. Standardização das soluções – Calculo dos factores f1 e f2

3.2.5.1. Standardização da solução de EDTA

Pesar com uma precisão de $\pm 0,0005\text{g}$ ($1,00 \pm 0,01$) g de carbonato de cálcio (CaCO_3) que corresponde a massa m_1 . E coloca-la num copo de 400 ml, com aproximadamente 100 ml de água. Cobrir o copo com um relógio de vidro e cuidadosamente introduzir aproximadamente 10 ml de ácido clorídrico (1+2). Agitar com uma vareta de vidro e assegurar que se completa a dissolução, levar a ebulição (Figura 27), a fim de expulsar o dióxido de carbono dissolvido. Arrefecer à temperatura ambiente, transferir para um balão volumétrico, lavar o copo e o relógio de vidro cuidadosamente com água, adicionando a lavagem para e completar até 1000 ml com água.

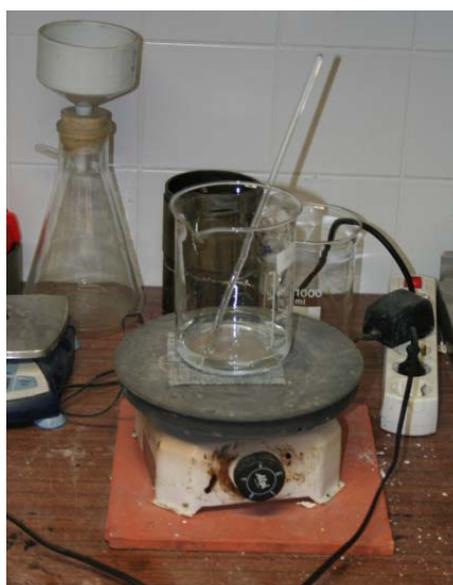


Figura 27 - Placa de aquecimento

Reacção Pozolânica de Metacaulinos e Diatomites em Argamassas de Reabilitação

Pipetar 50 ml da solução de cálcio no copo adequado. Então diluído com água até um volume adequado para o funcionamento do aparelho. Usando o pH meter, ajustar o pH da solução (12,5 +- 0,2) com a solução de hidróxido de sódio.

Determinar o ponto final com o seguinte método:

→Determinação visual do ponto final:

Adicionar, sem pesar, cerca de 0,1g do indicador de calcon. Agitar e titular com 0,03 mol/l da solução de EDTA até a cor mudar de rosa (Figura 28) para azul, e uma gota em excesso não aumenta a intensidade da cor azul. O volume V_1 é usado para calcular o factor de standardização f_1 usando a equação (21):



Figura 28 - Titulação (cor rosa)

$$f_1 = \frac{m_1 \times 50}{100,09 \times 0,03 \times V_1} = \frac{m_1}{V_1} \times 16,652 \quad (21)$$

3.2.5.2. Standardização de 0,1 mol/l da solução de ácido clorídrico

Pesar com uma precisão de +- 0,0005g, (0,200+- 0,001)g de carbonato de sódio, m_2 , adiciona-lo a um frasco cónico de 250 ml e dissolve-lo com 50ml a 75ml de água.

Adicionar 5 gotas do indicador de vermelho de metil na solução e titular com 0,1mol/l de ácido clorídrico diluído ate a cor mudar de amarelo (Figura 29) para laranja. Cálculo do factor f_2 , da solução de ácido clorídrico com a equação (22):



Figura 29 - Titulação (cor amarela)

$$f_2 = \frac{m_2 \times 2}{105,989} \times \frac{1000}{0,1 \times V_2} = \frac{m_2}{V_2} \times 188,7 \quad (22)$$

Onde:

m_2 é a massa de carbonato de sódio em gramas

V_2 é o volume de ácido clorídrico usado para a titulação em mililitros

3.2.5.3. Determinação da concentração do ião hidróxido

Agitar o frasco de vacuum para homogeneizar o filtrado e pipetar 50ml da solução num copo de 250 ml. Adicionar 5 gotas do indicador de vermelho de metil e determinar a alcalinidade total com 0,1mol/l de ácido clorídrico diluído. Manter a solução titulada A, para a determinação da concentração de óxido de cálcio.

Calcular a concentração do ião hidróxido, $[OH]^-$, em milimoles por litro, com a equação (23).

$$[OH]^- = \frac{1000 \times 0,1 \times V_3 \times f_2}{50} = 2 \times V_3 \times f_2 \quad (23)$$

Onde:

V_3 é o volume de 0,1 mol/l da solução de ácido clorídrico usada para a titulação, em mililitros;

f_2 é o factor de 0,1 mol/l da solução de ácido clorídrico

3.2.5.4. Determinação da concentração de óxido de cálcio

Usando a solução titulada A, e depois de completar o ponto 3.4.6 ajustar o pH para (12,5 +- 0,2) com a solução de hidróxido de sódio, usando um pH meter. Titular com 0,03 mol/l da solução de EDTA, determinando o ponto final com o métodos de 3.4.5.1.

Calcular a concentração de óxido de cálcio $[CaO]$, em milimoles por litros, com a equação (24):

$$[CaO] = \frac{1000 \times 0,03 \times V_4 \times f_1}{50} = 0,6 \times V_4 \times f_1 \quad (24)$$

Onde:

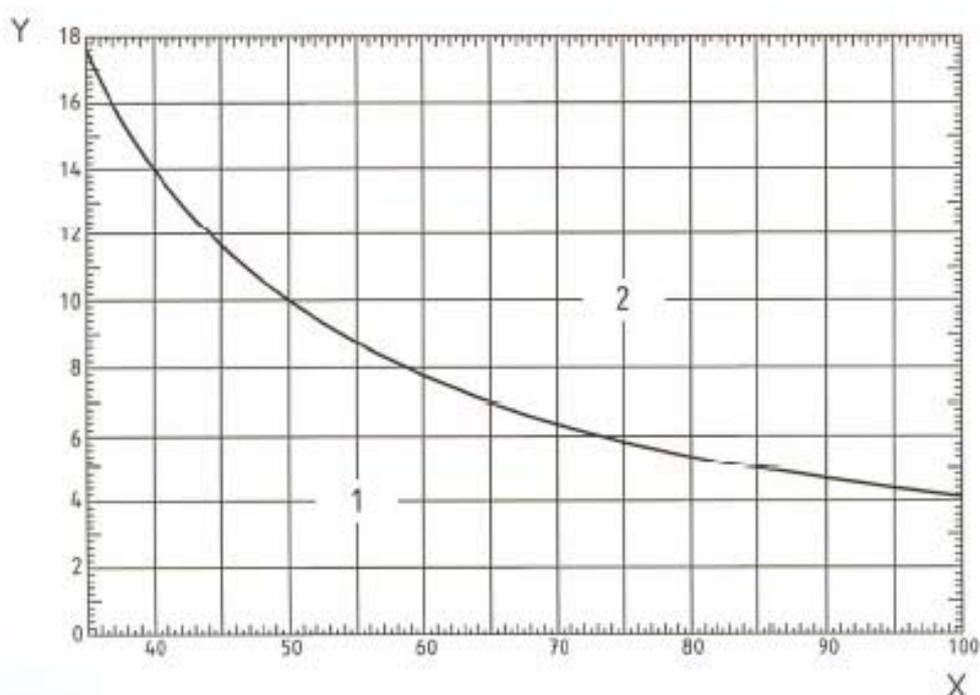
V_4 é o volume da solução de EDTA usada para a titulação, em milimoles

f_1 é o factor da solução de EDTA

Se os dois resultados dos ensaios diferem em mais de duas vezes o desvio-padrão da repetibilidade, repetir o teste e tomar a média dos resultados dos testes mais próximo.

3.2.5.5. Avaliação da pozolânidade

Expimir graficamente (Figura 30) as concentrações do ião hidróxido e ião cálcio (expresso em óxido de cálcio), na solução, obtidas pelas equações (23) e (24), na qual mostra a concentração de saturação de ião cálcio (expresso em óxido de cálcio) em função da concentração do ião hidróxido a temperatura de 40°C. Nas Figuras 31 e 32, esquematiza-se esta avalização. Os matérias pozolânicos satisfazem o teste para a pozolânicidade quando o ponto obtido está abaixo da curva da concentração saturada do ião cálcio (expresso em óxido de cálcio).



Legenda

1 Satisfaz

2 Não satisfaz

X Concentração em ião hidróxido, mmol/L

Y Concentração em ião cálcio (expresso em óxido de cálcio), mmol/L

Figura 30 - Diagrama para a determinação da pozolânidade (NP EN 196-5)

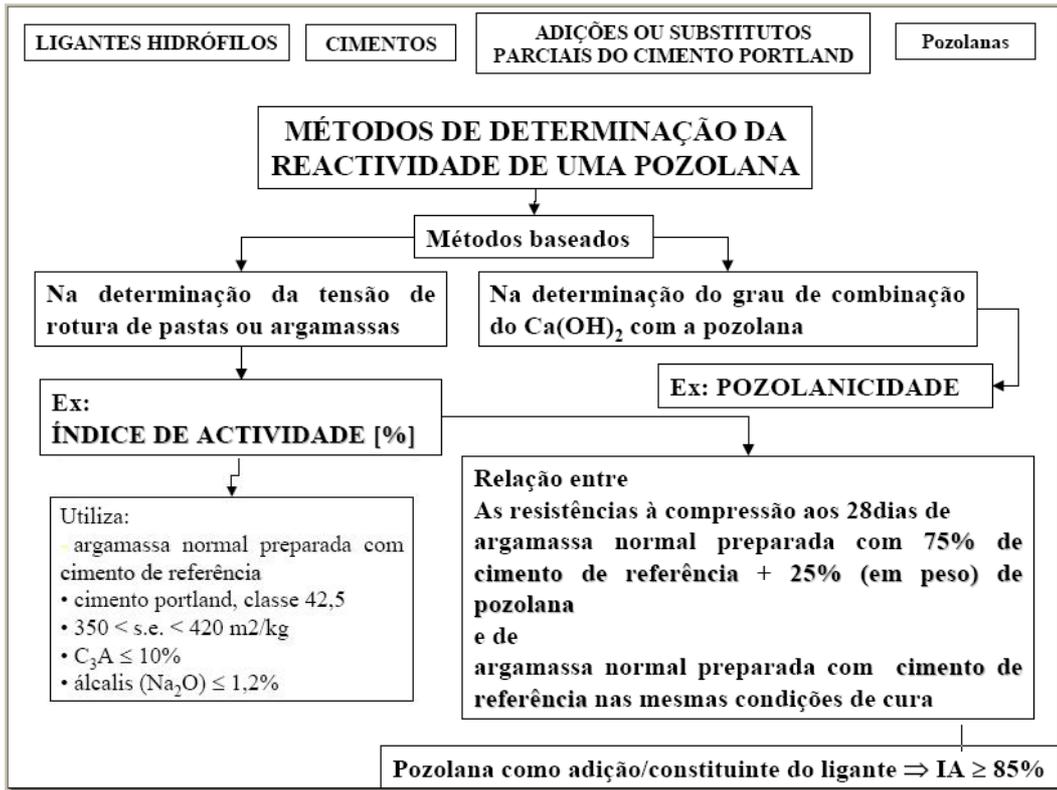


Figura 31 - Métodos de determinação da reactividade de uma pozolana

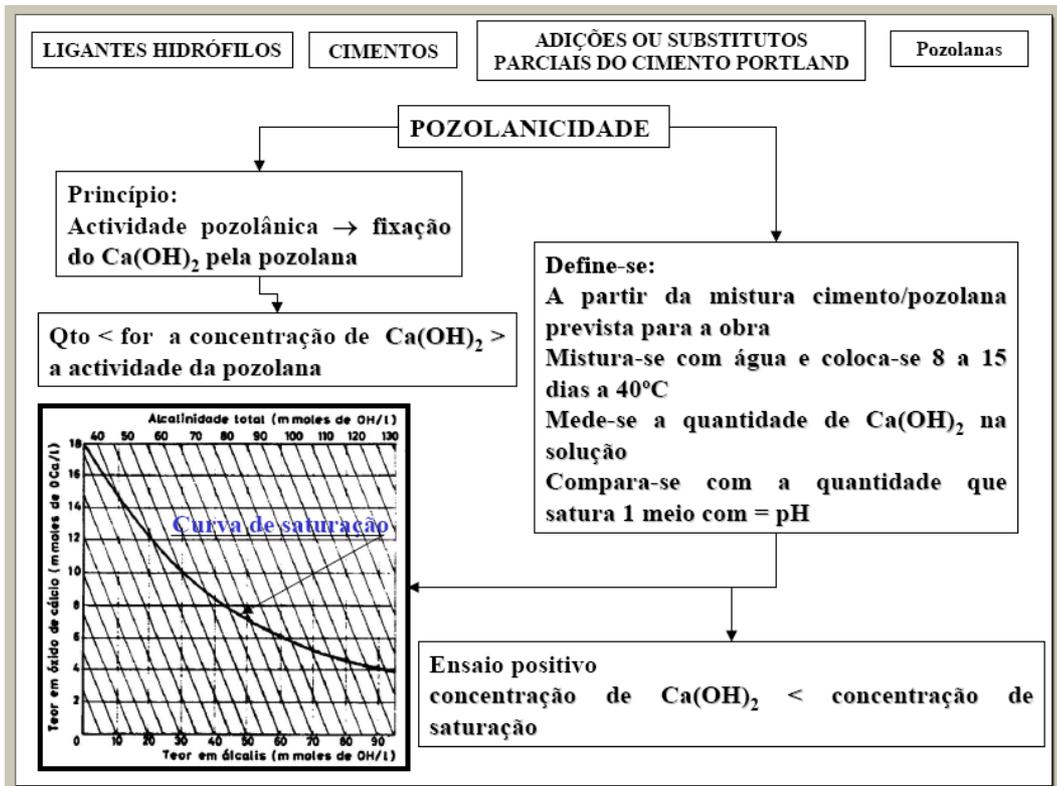


Figura 32 - Métodos de determinação da reactividade de uma pozolana

3.3. Formulação de argamassas

As composições das argamassas formuladas estão nas tabelas 15 a 18. Efectuaram-se composições com os materiais referidos, sendo a nomenclatura a seguinte:

- ACM1 (areia com cal aérea e 20%metacaulino 1:3; 18%H₂O)
 ACD1 (areia com cal aérea e 20%diatomite 1:3; 18%H₂O)
 ACM11 (areia com cal aérea e 30%metacaulino 1:3; 18%H₂O)
 ACD11 (areia com cal aérea e 30%diatomite 1:3; 19%H₂O)
 ACM111 (areia com cal aérea e 50%metacaulino 1:3; 18%H₂O)
 ACD111 (areia com cal aérea e 50%diatomite 1:3; 21%H₂O)
 AC1 (areia com cal aérea 1:3; 18%H₂O)

Tabela 15 - Resumo do Grupo de Composições

| Nome | Grupo de Composições (1) | Grupo de Composições (2) | Grupo de Composições (3) |
|--------|---|---|---|
| ACM1 | 89,5%Areia 8,4%Cal Aérea 2,1%Metacaulino | 85,0%Areia 12,0%Cal Aérea 3,0%Metacaulino | 89,5%Areia 10,5%Cal Aérea 2,1%Metacaulino |
| ACD1 | 89,5%Areia 8,4%Cal Aérea 2,1%Diatomite | 85,0%Areia 12,0%Cal Aérea 3,0%Diatomite | 89,5%Areia 10,5%Cal Aérea 2,1%Diatomite |
| ACM11 | 89,5%Areia 7,35%Cal Aérea 3,15%Metacaulino | 85,0%Areia 10,5%Cal Aérea 4,5%Metacaulino | 89,5%Areia 10,5%Cal Aérea 3,15%Metacaulino |
| ACD11 | 89,5%Areia 7,35%Cal Aérea 3,15%Diatomite | 85,0%Areia 10,5%Cal Aérea 4,5%Diatomite | 89,5%Areia 10,5%Cal Aérea 3,15%Diatomite |
| ACM111 | 89,5%Areia 5,25%Cal Aérea 5,25%Metacaulino | 85,0%Areia 7,5%Cal Aérea 7,5%Metacaulino | 89,5%Areia 10,5%Cal Aérea 5,25%Metacaulino |
| ACD111 | 89,5%Areia 5,25%Cal Aérea 5,25%Diatomite | 85,0%Areia 7,5%Cal Aérea 7,5%Diatomite | 89,5%Areia 10,5%Cal Aérea 5,25%Diatomite |
| AC1 | 89,5%Areia 10,5%Cal Aérea | 85,0%Areia 15,0%Cal Aérea | |

Tabela 16 – Grupo de Composições (1) das argamassas (em gramas)

| Nome | %Adição | Grupo de Composições (1) | | | | | |
|--------|---------|--------------------------|-----------|--------------|-----------|----------------|------|
| | | AREIA | CAL AERÉA | METACAU-LINO | DIATOMITE | TOTAL AGREGADO | AGUA |
| ACM1 | 20% | 1342,5 | 126 | 31,5 | | 1500 | 18% |
| ACM1 | | 1342,5 | 126 | 31,5 | | 1500 | 18% |
| ACM1 | | 1342,5 | 126 | | 31,5 | 1500 | 18% |
| ACM1 | | 1342,5 | 126 | | 31,5 | 1500 | 18% |
| ACM11 | 30% | 1342,5 | 110,25 | 47,25 | | 1500 | 18% |
| ACM11 | | 1342,5 | 110,25 | 47,25 | | 1500 | 18% |
| ACM11 | | 1342,5 | 110,25 | | 47,25 | 1500 | 18% |
| ACM11 | | 1342,5 | 110,25 | | 47,25 | 1500 | 18% |
| ACM111 | 50% | 1342,5 | 78,75 | 78,75 | | 1500 | 18% |
| ACM111 | | 1342,5 | 78,75 | 78,75 | | 1500 | 18% |
| ACM111 | | 1342,5 | 78,75 | | 78,75 | 1500 | 18% |
| ACM111 | | 1342,5 | 78,75 | | 78,75 | 1500 | 18% |
| AC1 | | 1342,5 | 157,5 | | | 1500 | 18% |
| AC1 | | 1342,5 | 157,5 | | | 1500 | 18% |

Tabela 17 - Grupo de Composições (2) das argamassas (em gramas)

| Nome | %Adição | Grupo de Composições (2) | | | | | |
|--------|---------|--------------------------|-----------|--------------|-----------|----------------|------|
| | | AREIA | CAL AERÉA | METACAU-LINO | DIATOMITE | TOTAL AGREGADO | AGUA |
| ACM1 | 20% | 1275 | 180 | 45 | | 1500 | 18% |
| ACM1 | | 1275 | 180 | 45 | | 1500 | 18% |
| ACM1 | | 1275 | 180 | | 45 | 1500 | 18% |
| ACM1 | | 1275 | 180 | | 45 | 1500 | 18% |
| ACM11 | 30% | 1275 | 157,5 | 67,5 | | 1500 | 18% |
| ACM11 | | 1275 | 157,5 | 67,5 | | 1500 | 18% |
| ACM11 | | 1275 | 157,5 | | 67,5 | 1500 | 19% |
| ACM11 | | 1275 | 157,5 | | 67,5 | 1500 | 19% |
| ACM111 | 50% | 1275 | 112,5 | 112,5 | | 1500 | 18% |
| ACM111 | | 1275 | 112,5 | 112,5 | | 1500 | 18% |
| ACM111 | | 1275 | 112,5 | | 112,5 | 1500 | 21% |
| ACM111 | | 1275 | 112,5 | | 112,5 | 1500 | 21% |
| AC1 | | 1275 | 225 | | | 1500 | 18% |
| AC1 | | 1275 | 225 | | | 1500 | 18% |

Tabela 18 - Grupo de Composições (3) das argamassas (em gramas)

| Nome | %Adição | Grupo de Composições (3) | | | | | |
|--------|---------|--------------------------|-----------|-------------|-----------|----------------|------|
| | | AREIA | CAL AERÉA | METACAULINO | DIATOMITE | TOTAL AGREGADO | AGUA |
| ACM1 | 20% | 1342,5 | 157,5 | 31,5 | | 1531,5 | 18% |
| ACM1 | | 1342,5 | 157,5 | 31,5 | | 1531,5 | 18% |
| ACD1 | | 1342,5 | 157,5 | | 31,5 | 1531,5 | 18% |
| ACD1 | | 1342,5 | 157,5 | | 31,5 | 1531,5 | 18% |
| ACM11 | 30% | 1342,5 | 157,5 | 47,25 | | 1547,25 | 18% |
| ACM11 | | 1342,5 | 157,5 | 47,25 | | 1547,25 | 18% |
| ACD11 | | 1342,5 | 157,5 | | 47,25 | 1547,25 | 19% |
| ACD11 | | 1342,5 | 157,5 | | 47,25 | 1547,25 | 19% |
| ACM111 | 50% | 1342,5 | 157,5 | 78,75 | | 1578,75 | 18% |
| ACM111 | | 1342,5 | 157,5 | 78,75 | | 1578,75 | 18% |
| ACD111 | | 1342,5 | 157,5 | | 78,75 | 1578,75 | 20% |
| ACD111 | | 1342,5 | 157,5 | | 78,75 | 1578,75 | 20% |

Os três grupos de composições diferem na razão agregado/ligante, e na percentagem de ligante e aditivo utilizado. Ou seja, o grupo de composições (1), tem um traço de 1:3, numa razão agregado/ligante, e a percentagem de aditivo utilizada, é retirada ao ligante. No grupo de composições (2), a única diferença em relação a anterior, consiste no traço, e neste caso é de 1:2. No grupo de composições (3), é de todo igual ao grupo de composições (1), só que neste caso a percentagem de aditivo em vez de se retirar ao ligante, acrescenta-se ao ligante, isto é, fica em excesso.

3.4. Execução e ensaios de consolidação das argamassas

Os ensaios a realizar são caracterizados tanto no estado fresco, reologia, densidade em fresco, determinação da consistência por espalhamento, como no endurecido, ensaio de resistência mecânica a tracção por flexão, ensaio de resistência mecânica por compressão, capilaridade, módulo de young, esclorometro.

Procedeu-se (EN 1015-2) a pesagem dos agregados e ligantes, colocou-se as composições já mencionadas em sacos plásticos, (Figura 33). Para cada composição efectuou-se todas as pesagens necessárias, para posterior eficácia na execução dos provetes. No processo de mistura usou-se uma maquina (Figura 34), onde se colocou

primeiro a água e só depois os agregados. E deixou-se misturar durante 30s, com um compasso de espera de 30s, e com mais 60s de mistura.

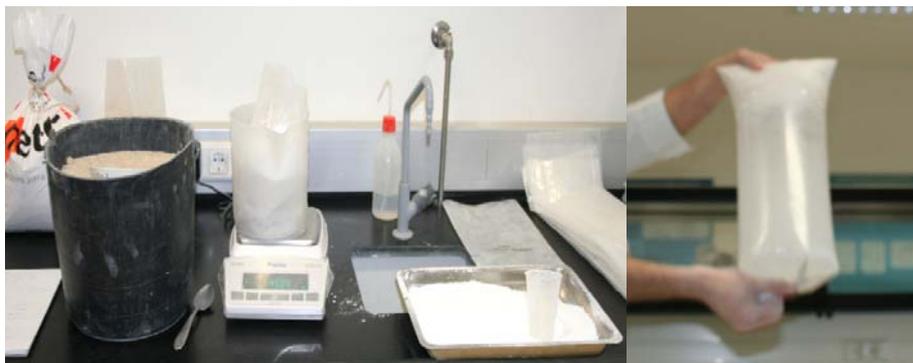


Figura 33 - Visualização do processo de pesagem e do saco tipo utilizado e posterior mistura dos agregados



Figura 34 - Misturadora

Logo após acabar este processo de mistura retirou-se uma pequena amostra da argamassa e colocou-se no aparelho de espalhamento (Figura 35).

Depois de determinar este parâmetro, colocou-se a argamassa nos moldes dos provetes (Figura 36), encheu-se metade de cada compartimento do molde, previamente oleado e com a sua prolonga fixa. Estendeu-se a primeira camada de argamassa no molde, com o auxílio da espátula maior, mantida verticalmente com os bordos em contacto com a parte superior da prolonga, fazendo-a passar para a esquerda e para a direita, ao longo de cada compartimento do molde. Adaptou-se convenientemente o molde à mesa, de modo a compactar a primeira camada de argamassa com 10 pancadas. Introduziu-se a

segunda camada de argamassa no molde usando a espátula menor e compactei-a com mais 15 pancadas. Com a ajuda de uma régua metálica plana, em movimento de serra, eliminou-se o excesso de argamassa alisando a superfície dos provetes. Limpou-se, com papel, a argamassa que fica no perímetro do molde após o nivelamento da superfície. Identificou-se os provetes que serviram mais tarde, após a cura, para os ensaios mecânicos e de capilaridade.



Figura 35 - Ensaio de espalhamento

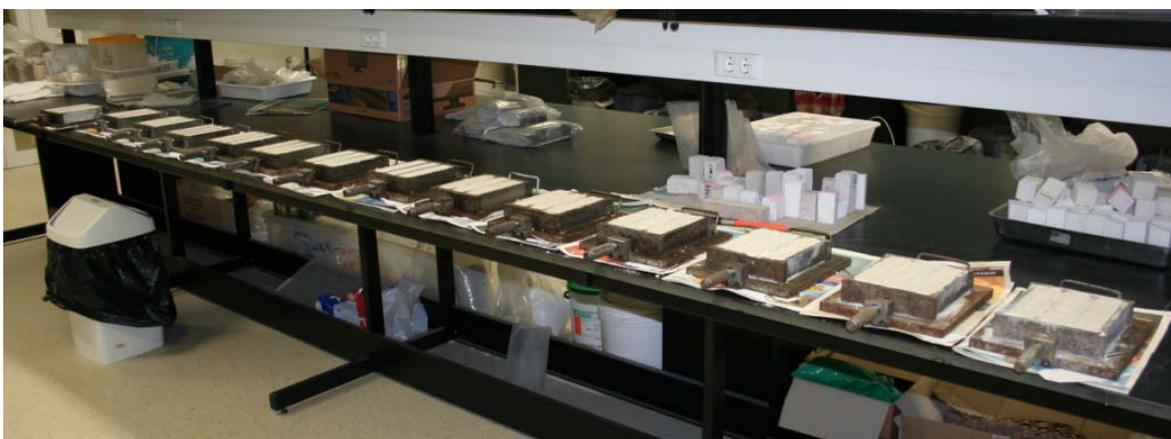


Figura 36 - Visualização dos provetes

3.4.1. Cura dos provetes

Após a realização dos provetes (prismas) colocam-se dentro de sacos plásticos para garantir uma humidade de 95% a 20°C, durante 7 dias. Após este período desmoldam-se e colocam-se numa sala de condicionamento com 65% de humidade e temperatura de 20°C (Figura 37) durante o tempo de cura específico (28, 60 ou 90 dias).



Figura 37 - Câmara húmida

3.4.2. Densidade em fresco

Em relação ao procedimento a adoptar, enche-se um copo de volume conhecido com a argamassa e de seguida compacta-se. Retira-se a argamassa em excesso e pesa-se. A densidade calcula-se pela razão do peso do copo com o volume conhecido (Equação 25).

$$Densidade = \frac{Massa Amostra}{Volume Amostra} \quad (25)$$

3.4.3. Determinação da consistência por espalhamento

O ensaio de determinação da consistência por espalhamento ou “Slump test” foi executado segundo a norma EN 1015-3.

Para este ensaio é necessário recorrer a um molde tronco-cónico (Figura 35), em chapa metálica galvanizada, com dimensões normativas e uma mesa de consistência com características expressas na norma.

Em relação ao procedimento a adoptar, começou-se por encher o molde cónico com argamassa, em duas camadas, compactando 10 vezes cada camada com um varão da compactação.

Posteriormente, retirou-se a argamassa em excesso e remove-se o molde. Após aplicar 15 pancadas em 15 segundos, a argamassa espalhar-se-á (Figura 38). Por fim, procede-se à medição, em milímetros, nos diâmetros gravados na mesa de consistência.



Figura 38 - Espalhamento da argamassa

3.4.4. Reologia

Em linhas gerais, reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria. O reómetro utilizado (Viskomat) foi especificamente desenhado para medir o comportamento reológico de argamassas. O Viskomat (Figura 39) consiste num contentor cilíndrico onde a amostra é colocada quando já devidamente misturada, sendo este copo depois montado num suporte de rotação variável. Uma pá concêntrica de geometria adequada está montada numa cabeça que mede o torque, pois à medida que o copo roda, a resistência viscosa que a argamassa oferece ao fluxo através das lâminas da pá origina um torque que é continuamente registado electronicamente ao longo de toda a duração do ensaio. Este reómetro é adequado para medir argamassas contendo partículas com dimensão até 2mm.



Figura 39 - Reometro utilizado para argamassas (Viskomat)

Como foi atrás referido, a velocidade de rotação do copo pode ser variável de acordo com o tipo de teste programado. O tipo de teste a efectuar é definido pelo operador através de perfis de velocidade em função do tempo.

Neste estudo utilizaram-se dois tipos de perfis. O primeiro perfil, denominado patamar, é um perfil onde a velocidade permanece constante, a 160 rpm, ao longo de cerca de 60 minutos, embora com descidas de velocidade periódicas, de 15 em 15 minutos, em que a velocidade decresce até zero em 30 segundos e logo a seguir aumenta no mesmo período até às 160 rpm iniciais. Nas zonas de variação de velocidade, mais especificamente na descida das 160 rpm até zero, podem construir-se as curvas de fluxo. As curvas de fluxo são representações da variação do torque em função da velocidade de rotação, a partir das quais é possível determinar constantes proporcionais à viscosidade plástica (h) e à tensão de cedência (g) através do declive da recta e da ordenada na origem, respectivamente, considerando tratar-se de um comportamento Binghamiano típico ($T=g+hN$).

Este ensaio foi feito para o grupo de composições (2), nas percentagens de 30% e 50%, em comparação com areia a cal aérea sem aditivos pozolânicos.

3.4.5. Ensaio de resistência mecânica à tracção por flexão

Este ensaio é realizado seguindo a norma EN 1015-11.

Para este ensaio utilizou-se provetes com dimensões 40mmx40mmx160mm, moldados em temperaturas de 20°C ± 2°C e em humidade relativa de 95% ± 5%. Estes moldes normalizados foram posteriormente mantidos à temperatura já indicada, mas a uma humidade relativa de 65% ± 5%.

O ensaio de resistência à tracção à flexão necessita de uma máquina de ensaios que cumpra os requisitos na norma indicada (Figura 40). O seu procedimento baseia-se na colocação de cada provete sobre os cilindros de apoio, com o seu eixo longitudinal perpendicular aos apoios e posterior aplicação da carga concentrada a meio vão, com um aumento uniforme. O ensaio é efectuado a uma velocidade de 0,5mm/min. A velocidade do travessão para posicionamento das cabeças é de 50mm/min.

O resultado será obtido através da equação 26.



Figura 40 - Ensaio de resistência à tracção por flexão

$$R_t = 1,5 \frac{F_f L}{bd^2} = \frac{3F_f L}{2l^3} [MPa] \quad (26)$$

Em que se representa:

R_t - resistência à flexão, em Newtons por milímetros quadrado

b - largura do prisma, em milímetros

d - espessura do prisma, em milímetros

l - quando b=d, representa-se o lado da secção transversal cúbica (mm)

Ff - carga aplicada no centro do prisma na rotura, em Newtons

L - distância entre os apoios, em milímetros

O ensaio descrito efectua-se aos 28 dias e 90 dias, para o grupo de composições (1) e (2), e aos 28 dias e 60 dias para o grupo de composições (3), para a caracterização das argamassas, recorrendo-se a 3 prismas em cada uma das idades. Todavia, é também realizado em idades mais tardias, a fim de se compreender a evolução desta propriedade.

3.4.6. Ensaio de resistência mecânica por compressão

O ensaio de compressão, foi realizado de acordo com a norma EN 1015-11, parte dos meios-prismas resultantes do ensaio de resistência à tracção por flexão, como elementos a contemplar no estudo. Aplica-se, sobre a face de 40mmx40mm do meio-prisma, uma carga com um aumento uniforme, por meio de uma máquina de ensaios de resistência à compressão, a fim de ocorrer a rotura num período de 30s a 90s. O ensaio é efectuado a uma velocidade de 0,5mm/min. A velocidade do travessão para posicionamento das cabeças de compressão é de 50mm/min. O ensaio realiza-se aos 28 dias, 60 dias, 90 dias (Figura 41).

Para se calcular o resultado aplicou-se a equação 27.



Figura 41 - Ensaio de resistência por compressão

$$R_c = \frac{F_c}{A} [MPa] \quad (27)$$

Em que se representa:

Rc - resistência à compressão, em Newtons por milímetro quadrado

Fc- carga máxima na rotura, em Newtons

A - Área do provete em contacto com a cabeça de compressão, em milímetros quadrados

3.4.7. Capilaridade

Os provetes inteiros utilizados no ensaio de capilaridade apresentam as medidas de 40mm x 40mm x 160mm, embora se tenha usado provetes de variadas alturas.

Para a sua realização é necessário encher uma tina com água, com uma altura de 5mm, na qual se depositam os provetes em posição vertical, para se medir o aumento do peso ao longo do tempo (Figuras 42 e 43).

O resultado de ensaio registrar-se-á numa curva representando \sqrt{t} nas abcissas versus ΔM cumulativo nas ordenadas, em que t é o tempo e M a massa:



Figura 42 - Ensaio de capilaridade



Figura 43 - Pesagem continua ao longo do tempo dos provetes

O coeficiente de capilaridade (C), que corresponde ao declive da recta entre os pontos $\sqrt{10}$ min e $\sqrt{90}$ min, é dado pela equação 28.

$$\left(\frac{m}{A}\right) = C \times \sqrt{t} \quad (28)$$

Em que:

- m - quantidade de água absorvida;
- A - área em contacto com a água;
- t - tempo.

Optou-se por encurtar o intervalo de tempo de maneira a não chegarmos à fase de saturação do provete e assim conseguir um melhor coeficiente de correlação dos dados.

Segundo a norma EN 1015-18, o coeficiente de capilaridade deve ser expresso em $\text{Kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$. Este ensaio foi realizado aos 28 dias, 60 dias e 90 dias, utilizando-se três provetes prismáticos.

3.4.8. Avaliação indirecta do Modulo de Young (Pundit)

Para avaliar a resistência mecânica a compressão ou até o Modulo de Young a partir da velocidade da propagação dos ultra-sons, consegue-se utilizando um aparelho (Aparelho de medida da velocidade de propagação dos ultra-sons-PUNDIT – “Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester”) (Figura 44). Este dá o tempo da transmissão através do elemento estrutural. Sabendo a distância a que os impulsos “viajam”, ou seja, o comprimento do elemento estrutural, calcula-se a velocidade de propagação. Como a velocidade de propagação é proporcional ao módulo de elasticidade é possível determiná-lo. A solução entre estas características é dada pela equação (29).

$$\rho \times V^2 = E \quad (29)$$



Figura 44 - Pundit

As superfícies de apoio deverão apresentar-se lisas, colocando uma gordura leve, interposta entre a superfície e o transdutor, para melhorar o contacto.

Os transdutores deverão ser colocados em faces opostas e alinhadas (Figura 45), embora se possam adoptar outras disposições (transmissão indirecta ou semi-directa).

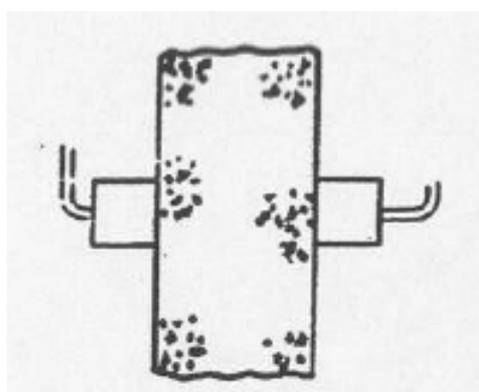


Figura 45 - Transmissão directa

A transmissão directa é a mais satisfatória (Figura 46).

Os impulsos não são transmitidos através de grandes vazios de ar no material.



Figura 46 - Calibração do aparelho

3.5. Aplicação “in situ” Muro

3.5.1. Aplicação “in situ” no muro de adobe das argamassas

Na aplicação destas argamassas no muro (adobe), teve como interesse pratico verificar o comportamento das pozolânas, metacaulino e diatomites, nas argamassas. E para tal utilizei as argamassas de maior concentração de pozolânas, isto é, de 50/50 nos grupos de composições (1) e (2).

3.5.2. Composição das argamassas

Tabela 19 - Grupo de Composições (1) das argamassas para o muro (em gramas)

| Nome | %Adição | Grupo de Composições (1) | | | | | |
|--------|---------|--------------------------|--------------|--------------|-----------|----------------|------|
| | | AREIA | CAL AERÉA | METACAU-LINO | DIATOMITE | TOTAL AGREGADO | AGUA |
| ACM111 | 50% | 34905 | 2047,5 | 2047,5 | | 39000 | 18% |
| ACM222 | | 34905 | 2047,5 | 2047,5 | | 39000 | 18% |
| ACD111 | | 34905 | 2047,5 | | 2047,5 | 39000 | 20% |
| ACD222 | | 34905 | 2047,5 | | 2047,5 | 39000 | 20% |

Tabela 20 - Grupo de Composições (2) das argamassas para o muro (em gramas)

| Nome | %Adição | Grupo de Composições (2) | | | | | |
|--------|---------|--------------------------|--------------|--------------|-----------|-------------------|------|
| | | AREIA | CAL AERÉA | METACAU-LINO | DIATOMITE | TOTAL AGREGADO | AGUA |
| ACM111 | 50% | 33150 | 2925 | 2925 | | 39000 | 18% |
| ACM222 | | 33150 | 2925 | 2925 | | 39000 | 18% |
| ACD111 | | 33150 | 2925 | | 2925 | 39000 | 18% |
| ACD222 | | 33150 | 2925 | | 2925 | 39000 | 18% |

3.5.3. Execução do revestimento

No processo de mistura utilizou-se um berbequim com uma haste de 50cm (Figura 47). Na aplicação das argamassas utilizou-se uma colher e uma talocha (Figura 48).



Figura 47 - Processo de mistura



Figura 48 - Aplicação das argamassas

3.5.4. Avaliação da dureza por Esclerômetro

Passados 28 dias, utilizou-se esclerômetro (Figura 49) para medir a dureza superficial da argamassa e a correlaciona-la com a resistência à compressão dessa argamassa.



Figura 49 - Esclerômetro

Pretendia-se registar em 5 partes da superfície do muro, o valor da dureza superficial, e comparar nas 4 composições efectuadas.

3.5.5. Avaliação de sulfatos e cloretos

Este método consiste em molhar a zona do muro que se quer estudar e com umas fitas, graduadas através de cores, medir os valores.



Figura 50 - Sulfatos e Cloretos

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

- 4.1. Reactividade pozolânica dos aditivos
- 4.2. Características em fresco das argamassas
- 4.3. Características das argamassas no estado endurecido
- 4.4. Ensaio “in situ” Muro de Adobe

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. Reactividade pozolânica dos aditivos

Os resultados indicam (Tabela 21), que em termos de pozolânidade a diatomite é muito mais reactiva que o metacaulino.

Este factor prende-se essencialmente com a composição química dos materiais, sendo condição essencial para o sucesso da reacção pozolânica a quantidade de aluminatos e silicatos activos, isto é, a quantidade de SiO_2 e Al_2O_3 em estado amorfo, capazes de reagir com o Ca(OH)_2 em presença da água.

Também é sabido que factores como a finura do material e, conseqüentemente, a sua superfície específica influenciam na sua reactividade, uma maior superfície específica implica obrigatoriamente uma maior área de reacção, influenciando assim no aumento da reactividade. Na figura 51 mostra representativamente os pontos determinados, e podemos verificar que quanto mais os pontos se afastam da curva de referencia mais reactivo é o material, e como se pode observar a diatomite afasta-se mais da curva de referencia. Tirando partido desta verificação podemos concluir que a diatomite tem uma enorme reacção pozolânica

Tabela 21 – Comparação de $[\text{OH}^-]$ e $[\text{CaO}]$ nas amostras ensaiadas

| | $[\text{OH}^-]$ mmol/l | | $[\text{CaO}]$ mmol/l | |
|-----------------------|------------------------|-------|-----------------------|------|
| Metacaulino amostra 1 | 53,03 | 52,19 | 5,56 | 5,56 |
| Metacaulino amostra 2 | 51,35 | | 5,56 | |
| Diatomite amostra 1 | 22,53 | 21,94 | 1,87 | 1,87 |
| Diatomite amostra 2 | 21,35 | | 1,87 | |

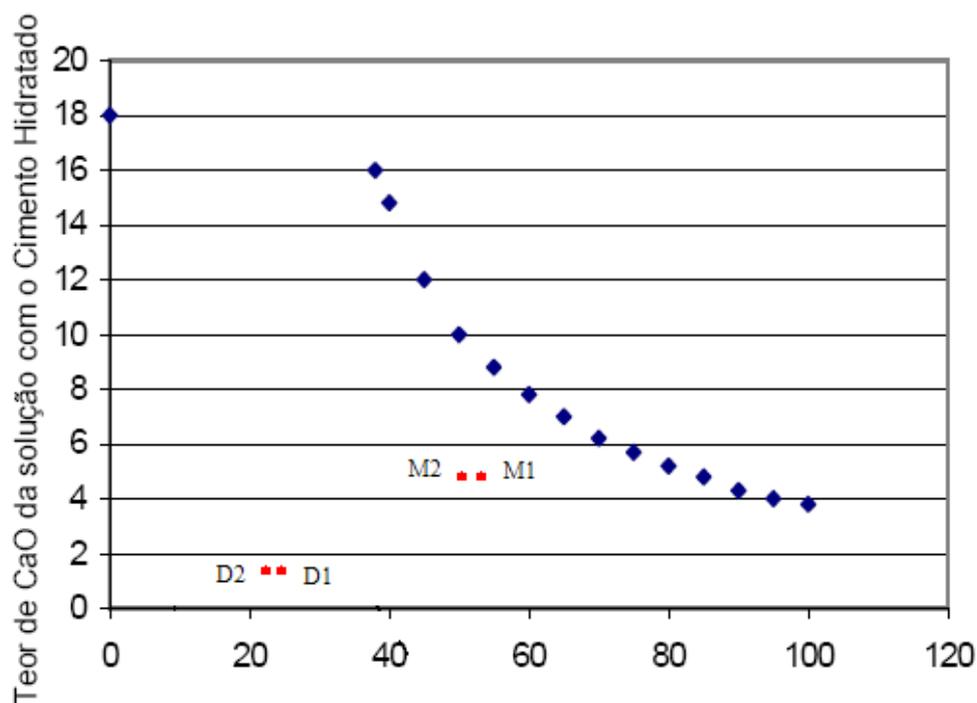


Figura 51 - Diagrama para a determinação da pozolânicidade

4.2. Características em fresco das argamassas

4.2.1. Densidade em fresco

Tabela 22 - Densidades em fresco dos provetes

| Nome | %Aditivo | Densidade em fresco (g/cm ³) | | |
|--------|----------|--|--------------------------|--------------------------|
| | | Grupo de composições (1) | Grupo de composições (2) | Grupo de composições (3) |
| ACM1 | 20% | 296,39 | 308,91 | 302,66 |
| ACD1 | | 301,73 | 309,75 | 305,74 |
| ACM11 | 30% | 305,80 | 311,67 | 308,73 |
| ACD11 | | 308,29 | 309,30 | 308,80 |
| ACM111 | 50% | 313,21 | 308,63 | 310,92 |
| ACD111 | | 311,22 | 302,45 | 306,83 |
| AC1 | | 312,22 | 311,98 | 312,22 |

Comparando em relação a referência AC1, as três composições, observamos que não existem grandes variações, os valores andam muito próximos da referência, isto tanto para o metacaulino e para a diatomite.

4.2.2. Determinação da consistência por espalhamento

Tabela 23 - Consistência por espalhamento

| | Consistência por espalhamento | | | | | |
|--------|-------------------------------|-----|--------------------------|-----|--------------------------|-----|
| | Grupo de composições (1) | | Grupo de composições (2) | | Grupo de composições (3) | |
| | S0 | S15 | S0 | S15 | S0 | S15 |
| ACM1 | 100 | 125 | 100 | 140 | 100 | 140 |
| ACD1 | 100 | 125 | 100 | 140 | 100 | 140 |
| ACM11 | 100 | 125 | 100 | 140 | 100 | 140 |
| ACD11 | 100 | 125 | 100 | 140 | 100 | 140 |
| ACM111 | 100 | 125 | 100 | 140 | 100 | 140 |
| ACD111 | 100 | 125 | 100 | 140 | 100 | 140 |
| AC1 | 100 | 130 | 100 | 140 | 100 | |

Verificou-se que, quanto maior for a percentagem de ligante maior o valor da consistência ao espalhamento, e que quanto maior for a percentagem de pozolanas, maior é a consistência ao espalhamento.

4.2.3. Comportamento reológico das argamassas – Efeito dos aditivos

Nesta análise foi estudado a argamassa do grupo de composições (2), com percentagens de 30 % e 50 % de diatomite e metacaulino. Observamos que, a variação do torque (Figuras 52 e 53) em relação a argamassas base CA1, no que diz respeito a diatomite, o valores são bastante mais elevados a mediada que a percentagem de diatomite aumenta, isto deve-se sobretudo a um maior acréscimo de água e devido também a sua superfície específica, o que implica uma maior área de contacto o que leva a que, sobre a lamina do reometro seja exercida uma maior força. Em relação ao metacaulino as evidencias não são tão significativas do que a diatomite, no entanto, em relação a argamassa base CA1, a variação de torque aumenta a medida que a percentagem de metacaulino aumenta. No que diz respeito a viscosidade observamos

que ao longo do tempo, a adição de pozolana de diatomite e metacaulino, não sofre qualquer alteração significativa em relação a argamassas base CA1, mantendo-se mais ou menos constantes, como se observa nas nas Figuras 54 e 55.

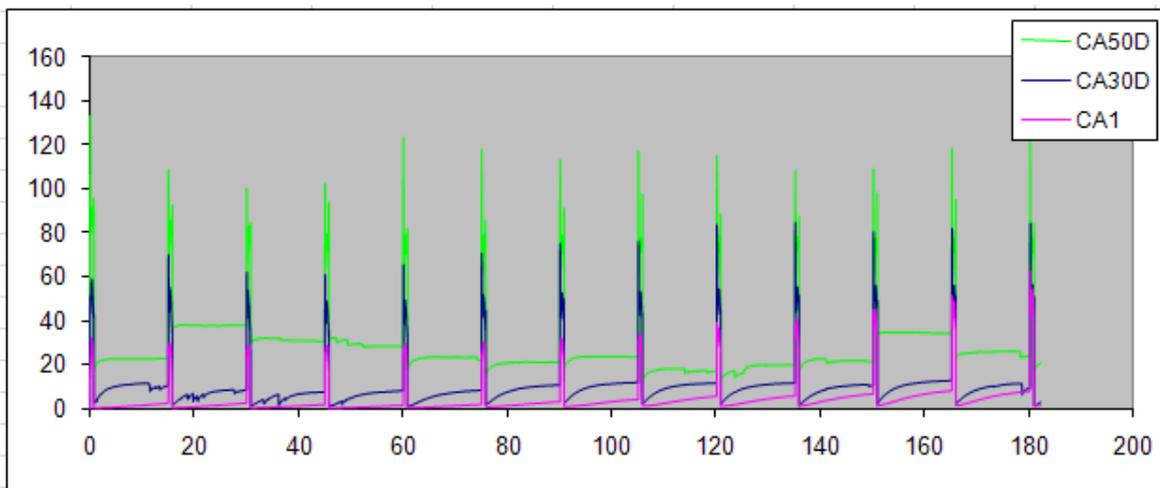


Figura 52 - Variação do torque em função do tempo de ensaio para a diatomite

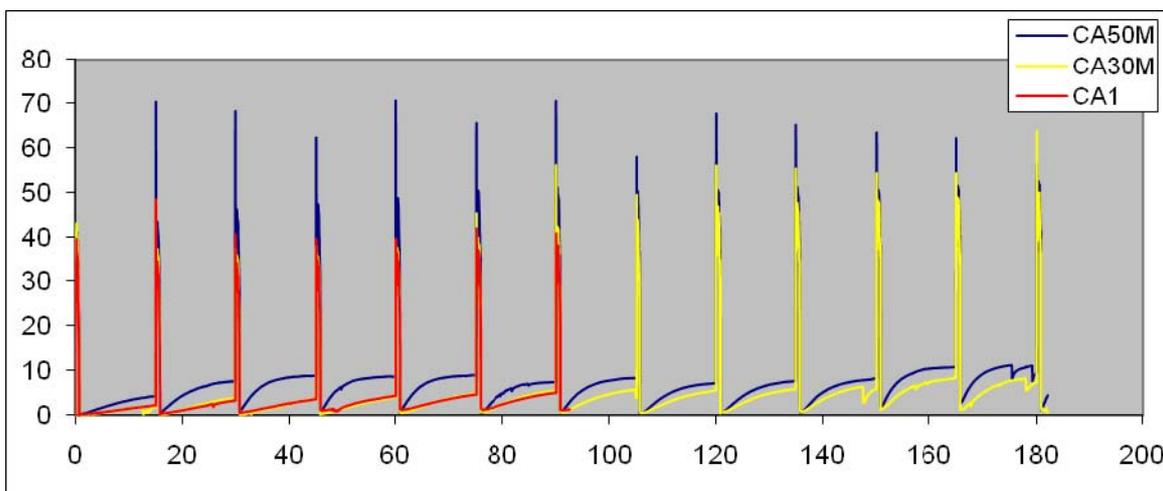


Figura 53 - Variação do torque em função do tempo de ensaio para o metacaulino

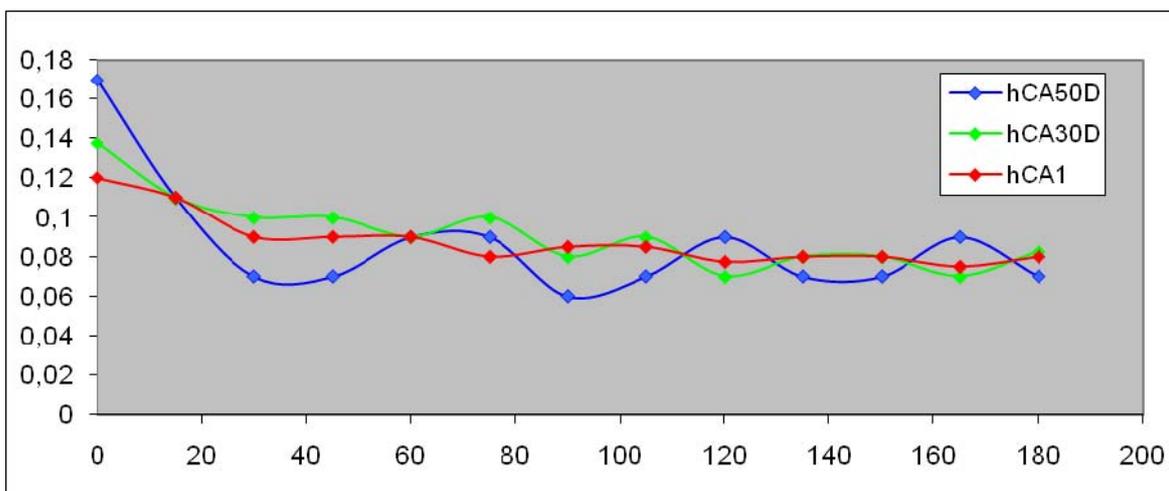


Figura 54 - Viscosidade contendo diatomite

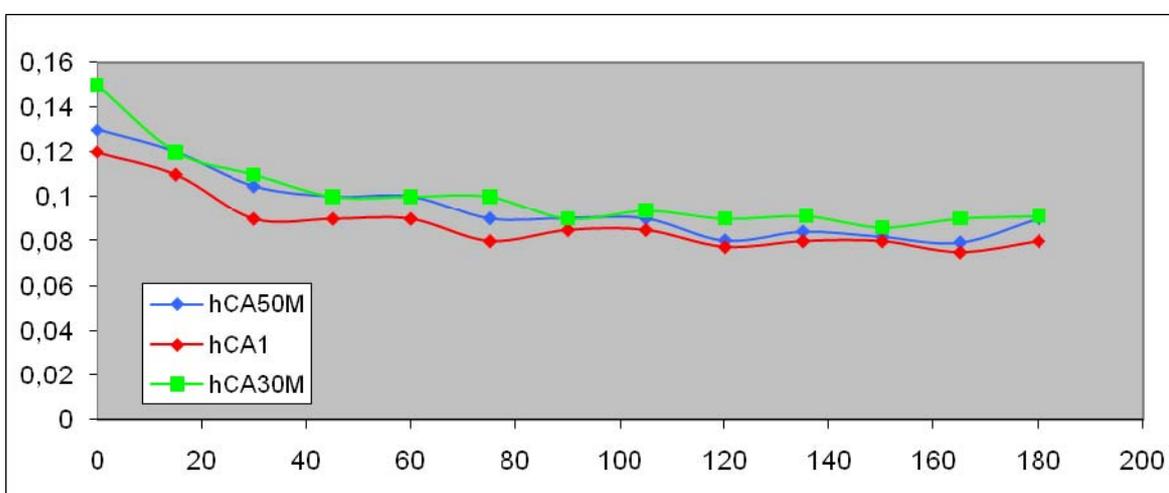


Figura 55 - Viscosidade contendo metacaulino

Já na tensão de cedência (Figuras 56 e 57), observamos situações bastante diferentes. Verifica-se que a adição de metacaulino e diatomite provocou um aumento da tensão de cedência especificamente no caso da diatomite. Julga-se que este efeito pode estar relacionado com a finura do material, ou seja, a sua elevada superfície específica, logo, necessita de absorver mais água de molhagem.

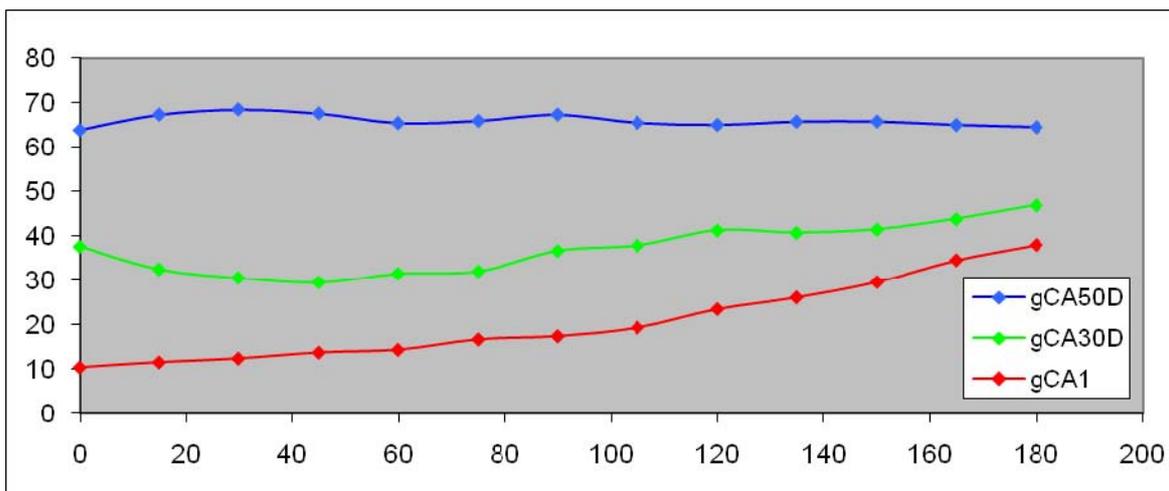


Figura 56 - Tensão de cedência contendo pozolâna de diatomite

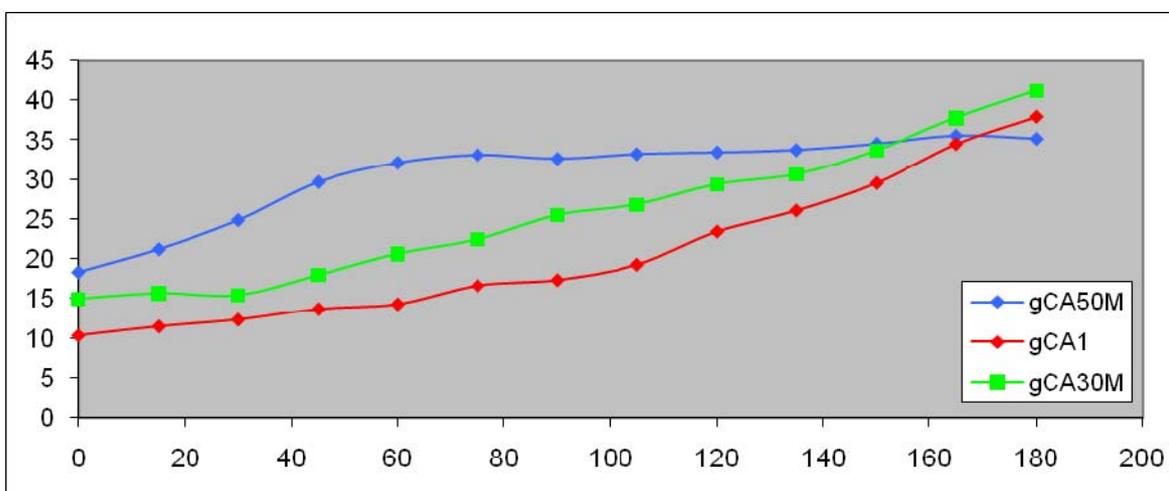


Figura 57 - Tensão de cedência contendo pozolâna de metacaulino

4.3. Características das argamassas no estado endurecido

4.3.1. Resistência mecânica

A tabela 24 mostra os valores de resistência mecânica por flexão e compressão, aos 28 dias e 90 dias, nos três grupos de composições diferentes.

Tabela 24 - Resistência mecânica à tracção por flexão e por compressão

| | | Resistência Mecânica | | | |
|--------------------------|--------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| | | 28 Dias | | 90 Dias | |
| | | R _f | R _c | R _f | R _c |
| Grupo de composições (1) | ACMI | 0,55 | 0,44 | 0,47 | 0,99 |
| | ACMII | 0,64 | 0,52 | 0,52 | 1,15 |
| | ACMIII | 0,7 | 0,71 | 0,55 | 1,37 |
| | ACDI | 0,41 | 0,65 | 0,47 | 1,17 |
| | ACDII | 0,43 | 0,8 | 0,56 | 1,57 |
| | ACDIII | 0,54 | 1,26 | 0,58 | 1,64 |
| | ACI | 0,66 | 0,55 | 0,75 | 1,25 |
| Grupo de composições (2) | ACMI | 0,59 | 0,73 | 0,54 | 1,48 |
| | ACMII | 0,37 | 0,62 | 0,62 | 1,50 |
| | ACMIII | 0,62 | 0,93 | 0,73 | 1,60 |
| | ACDI | 0,93 | 1,05 | 0,86 | 1,88 |
| | ACDII | 0,7 | 1,65 | 0,76 | 2,29 |
| | ACDIII | 0,76 | 3,39 | 0,64 | 2,43 |
| | ACI | 0,43 | 0,74 | 0,75 | 1,48 |
| Grupo de composições (3) | ACMI | 0,30 | 0,67 | 0,34 | 0,79 |
| | ACMII | 0,31 | 0,54 | 0,31 | 0,83 |
| | ACMIII | 0,35 | 0,63 | 0,36 | 0,88 |
| | ACDI | 0,30 | 0,57 | 0,31 | 0,98 |
| | ACDII | 0,30 | 0,71 | 0,40 | 1,04 |
| | ACDIII | 0,38 | 1,02 | 0,53 | 1,43 |

Pode-se salientar que no grupo de composições (1), os valores de resistência mecânica por flexão e compressão aumentam a medida que a percentagem de metacaulino e diatomite aumentam. Em relação a argamassas base CA1 os valores são significativamente superiores nas diatomites.

Fazendo uma comparação com o grupo de composições (3), verificamos que os valores são mais baixos que no grupo de composições (1), logo podemos concluir que não a benefícios em acrescentar aditivos ao ligante, mas sim em retirar.

No grupo de composições (3), foi onde se verificou melhores resultados, uma vez que se utilizou mais ligante, por sua vez mais aditivos. A diatomite obteve valores mais elevados do que o metacaulino, aumentado este valor a medida que a percentagem de aditivos

aumentava. Jalali afirma que uma adequada compactação de pastas de cal e pozolâna produz diferenças significativas no desempenho do material [13].

4.3.2. Avaliação do módulo de young (Pundit)

Tabela 25 – Avaliação Modulo Young Grupo de composições (1)

| Amostra | Provete | Sondagem 1 | Sondagem 2 | Media das sondagens (MPa) | Media dos provetes (MPa) | Densidade em fresco (g/cm ³) |
|---------|---------|------------|------------|---------------------------|--------------------------|--|
| ACM1 | 1 | 5583,24 | 6121,09 | 5852,17 | 4634,64 | 296,39 |
| | 2 | 3898,79 | 3973,4 | 3936,09 | | |
| | 3 | 4155,8 | 4075,49 | 4115,65 | | |
| ACM11 | 1 | 4142,14 | 4062,1 | 4102,12 | 4253,55 | 305,8 |
| | 2 | 4125,54 | 4125,54 | 4125,54 | | |
| | 3 | 4579,01 | 4486,98 | 4532,99 | | |
| ACM111 | 1 | 4897,23 | 4795,74 | 4846,49 | 5317,98 | 313,21 |
| | 2 | 4417,98 | 4507,68 | 4462,83 | | |
| | 3 | 6563,11 | 6726,17 | 6644,64 | | |
| ACD1 | 1 | 5428,68 | 5551,36 | 5490,02 | 4970,71 | 301,73 |
| | 2 | 4794,99 | 4895,41 | 4845,2 | | |
| | 3 | 4530,91 | 4622,9 | 4576,91 | | |
| ACD11 | 1 | 5428,6 | 5549,9 | 5489,25 | 4964,46 | 308,29 |
| | 2 | 4673,26 | 4770,11 | 4721,68 | | |
| | 3 | 4730,48 | 4634,43 | 4682,46 | | |
| ACD111 | 1 | 4480,56 | 4480,56 | 4480,56 | 4081,98 | 311,22 |
| | 2 | 3897,08 | 3970,96 | 3934,02 | | |
| | 3 | 3795,72 | 3867 | 3831,36 | | |
| AC1 | 1 | 5644,93 | 5644,93 | 5644,93 | 5458,86 | 312,22 |
| | 2 | 5580,6 | 5458,63 | 5519,62 | | |
| | 3 | 5267,77 | 5156,29 | 5212,03 | | |

Tabela 26 - Avaliação Modulo Young Grupo de composições (2)

| | Provete | Sondagem 1 | Sondagem 2 | Media das sondagens (MPa) | Media dos provetes (MPa) | Densidade em fresco (g/cm ³) |
|--------|---------|------------|------------|---------------------------|--------------------------|--|
| ACM1 | 1 | 5583,24 | 6121,09 | 5852,17 | 4634,64 | 308,91 |
| | 2 | 3898,79 | 3973,4 | 3936,09 | | |
| | 3 | 4155,8 | 4075,49 | 4115,65 | | |
| ACM11 | 1 | 4142,14 | 4062,1 | 4102,12 | 4253,55 | 311,67 |
| | 2 | 4125,54 | 4125,54 | 4125,54 | | |
| | 3 | 4579,01 | 4486,98 | 4532,99 | | |
| ACM111 | 1 | 4897,23 | 4795,74 | 4846,49 | 5317,98 | 308,63 |
| | 2 | 4417,98 | 4507,68 | 4462,83 | | |
| | 3 | 6563,11 | 6726,17 | 6644,64 | | |
| ACD1 | 1 | 5428,68 | 5551,36 | 5490,02 | 4970,71 | 309,75 |
| | 2 | 4794,99 | 4895,41 | 4845,2 | | |
| | 3 | 4530,91 | 4622,9 | 4576,91 | | |
| ACD11 | 1 | 5428,6 | 5549,9 | 5489,25 | 4964,46 | 309,3 |
| | 2 | 4673,26 | 4770,11 | 4721,68 | | |
| | 3 | 4730,48 | 4634,43 | 4682,46 | | |
| ACD111 | 1 | 4480,56 | 4480,56 | 4480,56 | 4081,98 | 302,45 |
| | 2 | 3897,08 | 3970,96 | 3934,02 | | |
| | 3 | 3795,72 | 3867 | 3831,36 | | |
| AC1 | 1 | 5644,93 | 5644,93 | 5644,93 | 5458,86 | 311,98 |
| | 2 | 5580,6 | 5458,63 | 5519,62 | | |
| | 3 | 5267,77 | 5156,29 | 5212,03 | | |

Tabela 27 - Avaliação Modulo Young Grupo de composições (3)

| | Provete | Sondagem 1 | Sondagem 2 | Media das sondagens (MPa) | Media dos provetes (MPa) | Densidade em fresco (g/cm ³) |
|--------|---------|------------|------------|---------------------------|--------------------------|--|
| ACM1 | 1 | 5583,24 | 6121,09 | 5852,17 | 4634,64 | 302,66 |
| | 2 | 3898,79 | 3973,4 | 3936,09 | | |
| | 3 | 4155,8 | 4075,49 | 4115,65 | | |
| ACM11 | 1 | 4142,14 | 4062,1 | 4102,12 | 4253,55 | 308,73 |
| | 2 | 4125,54 | 4125,54 | 4125,54 | | |
| | 3 | 4579,01 | 4486,98 | 4532,99 | | |
| ACM111 | 1 | 4897,23 | 4795,74 | 4846,49 | 5317,98 | 310,92 |
| | 2 | 4417,98 | 4507,68 | 4462,83 | | |
| | 3 | 6563,11 | 6726,17 | 6644,64 | | |
| ACD1 | 1 | 5428,68 | 5551,36 | 5490,02 | 4970,71 | 305,74 |
| | 2 | 4794,99 | 4895,41 | 4845,2 | | |
| | 3 | 4530,91 | 4622,9 | 4576,91 | | |
| ACD11 | 1 | 5428,6 | 5549,9 | 5489,25 | 4964,46 | 308,8 |
| | 2 | 4673,26 | 4770,11 | 4721,68 | | |
| | 3 | 4730,48 | 4634,43 | 4682,46 | | |
| ACD111 | 1 | 4480,56 | 4480,56 | 4480,56 | 4081,98 | 306,83 |
| | 2 | 3897,08 | 3970,96 | 3934,02 | | |
| | 3 | 3795,72 | 3867 | 3831,36 | | |
| AC1 | 1 | 5644,93 | 5644,93 | 5644,93 | 5458,86 | 312,22 |
| | 2 | 5580,6 | 5458,63 | 5519,62 | | |
| | 3 | 5267,77 | 5156,29 | 5212,03 | | |

Como podemos verificar os resultados foram coerentes (Tabela 25 a 27), isto é, quanto menos denso, menos compacto, menos rígido for o material, menor será o modulo de Young, ou seja, quanto maior for a percentagem de pozolâna de diatomite, menor será o modulo de Young, isto deve-se ao facto de a pozolâna de diatomite ser bastante pequena (12 µm), logo a formação de muito vazios.

4.3.3. Capilaridade

Tabela 28 – Capilaridade

| | | C Kg/m ² .h ^{0,5} | |
|--------------------------|--------|---------------------------------------|---------|
| | | 28 Dias | 90 Dias |
| Grupo de composições (1) | ACMI | 8,84 | 8,40 |
| | ACMII | 9,16 | 8,93 |
| | ACMIII | 9,71 | 7,90 |
| | ACDI | 10,29 | 9,68 |
| | ACDII | 11,20 | 10,39 |
| | ACDIII | 11,49 | 10,56 |
| | ACI | 10,31 | 8,67 |
| Grupo de composições (2) | ACMI | 10,26 | 9,64 |
| | ACMII | 9,98 | 9,40 |
| | ACMIII | 9,28 | 8,60 |
| | ACDI | 11,5 | 10,71 |
| | ACDII | 11,57 | 11,37 |
| | ACDIII | 11,55 | 11,75 |
| | ACI | 10,54 | 10,44 |
| Grupo de composições (3) | ACMI | 8,95 | 8,71 |
| | ACMII | 9,33 | 8,61 |
| | ACMIII | 10,27 | 9,56 |
| | ACDI | 10,00 | 9,15 |
| | ACDII | 12,60 | 9,35 |
| | ACDIII | 13,87 | 11,23 |

Verifica-se pela tabela 28 que para grupo de composições (1) a capilaridade, é mais baixa na pozolâna de metacaulino do que em relação a argamassa base CA1, mas a medida que a percentagem de metacaulino aumenta o valor da capilaridade é constante. Na diatomite, o valor assemelha-se muito ao valor da argamassa base CA1, mas a medida que as percentagens de diatomite aumentam o valor da capilaridade aumenta comparativamente.

No grupo de composições (2) a capilaridade diminui com o metacaulino a medida que a percentagem aumenta, e o valor é mais baixo do que o valor da argamassa base CA1, na diatomite o valor da capilaridade aumenta, a medida que a percentagem de pozolâna aumenta, e o valor é mais alto do que o valor da argamassa base CA1. Este facto deve-se ao aumento da água de amassadura, e ao facto das partículas (diatomite) serem muito pequenas (12 μm) e aglomerarem e formarem flocos.

No grupo de composições (3) os valores da capilaridade, não diferem muito do grupo de composições (1), por isso o comportamento das argamassas do grupo de composições (1), funcionou melhor que o grupo de composições (3).

4.4. Ensaio “in situ” Muro de Adobe

4.4.1. Aplicação

Na aplicação das argamassas de reabilitação no muro de adobe foi utilizado a formulação com 50% de aditivos dos grupos de composições (1) e (2). Esta aplicação vinha no intuito de verificar os valores obtidos na resistência mecânica, e verificar “in situ” o verdadeiro comportamento que as argamassas teriam.

Não foi de todo surpreendente, o comportamento da diatomite, nas argamassas, veio verificar o que já tinha verificado, isto é, no grupo de composições (1), a argamassa empregue, verificou ligeiras fissuras (Figura 59), no grupo de composições (2), apresentou inúmeras fissuras (Figura 59), isto tudo devido a retratilidade do material, a finura, e a elevada superfície específica.

Nas argamassas de metacaulino, o comportamento foi muito estável, tanto para grupo de composições (1) e (2) (Figura 58).



Figura 58 - Grupo de composições (1) e (2) metacaulino



Figura 59 - Grupo de composições (1) e (2) diatomite

4.4.2. Avaliação da dureza superficial (Esclerômetro)



Figura 60 – Medições efectuadas pelo esclerômetro

Tabela 29 - Valores obtidos pelo esclerômetro

| | Grupo de composições (1) | | Grupo de composições (2) | |
|-------|--------------------------|--------|--------------------------|--------|
| | ACM111 | ACD111 | ACM111 | ACD111 |
| 1 | 28 | 27 | 28 | 28 |
| 2 | 27 | 27 | 28 | 29 |
| 3 | 27 | 28 | 28 | 29 |
| 4 | 28 | 28 | 27 | 29 |
| 5 | 28 | 28 | 28 | 29 |
| Medio | 28 | 28 | 28 | 29 |

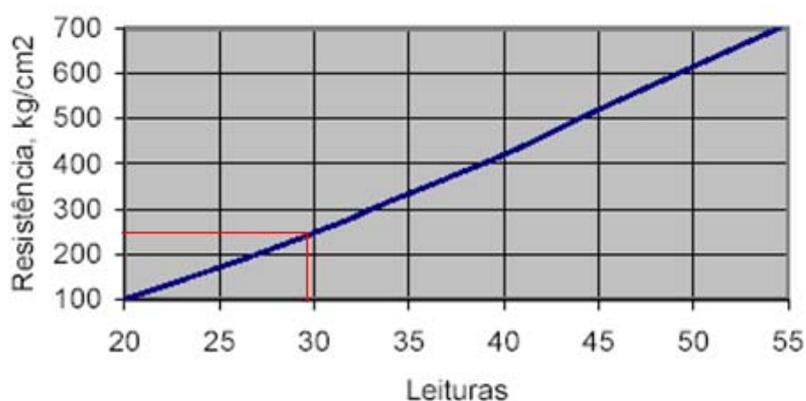


Figura 61 – Conversão de leitura do esclerômetro em valores de resistência mecânica a compressão

Na Figura 60 observamos as zonas onde foi feita a leitura, na Tabela 29, temos os valores obtidos (leitura do esclerômetro). Pode-se dizer que os valores não diferem muito e rondam os 27-29. Dizemos que o valor médio de resistência das argamassas no muro de adobe, anda muito próximo dos 250 kg/cm².

4.4.3. Determinação de sulfatos e cloretos



Figura 62 - Zonas de estudo

Tabela 30 - Valores de sulfatos e cloretos

| | | Grupo de composições (1) | | Grupo de composições (2) | |
|----------|---|--------------------------|----------|--------------------------|--------|
| Zonas | | ACM111 | ACD111 | ACM111 | ACD111 |
| Sulfatos | A | <400 | <200 | <200 | <200 |
| | B | <400 | <200 | <200 | <200 |
| Cloretos | A | 1000-1500 | 500-1000 | 500-1000 | 0-500 |
| | B | 0-500 | 500-1000 | 500-1000 | 0-500 |

Não conclusiva esta análise, vistos os valores andarem muito próximos.

5. CONCLUSÕES

5. CONCLUSÕES

É sabido que as argamassas de reabilitação com base em cal aérea necessitam de aditivos pozolânicos para melhorarem o seu comportamento.

Deste modo, este trabalho veio testar dois aditivos pozolânicos numa gama variadíssima de composições, para implementar em qualquer suporte (paredes, muros de adobe, etc), dependendo das condições de estabilidade das argamassas e mediante varias condições de serviço.

Neste trabalho, estudados três tipos de composições de argamassas, com a utilização de metacaulino e diatomites como aditivos, em diferentes percentagens. De acordo com as condições ou requisitos estabelecidos, podemos dizer que as argamassas estão desenvolvidas dentro dos limites, do que se pode denominar de argamassas de reabilitação, mas foi no grupo de composições (2) onde se obteve melhores resultados.

Determinou-se a reactividade pozolânica dos aditivos, chegando-se a conclusão de que a diatomite tem uma elevada reacção pozolânica, maior que a do metacaulino. Deste modo, estes dois aditivos poderiam ter um bom desempenho como argamassas de reabilitação.

Determinou-se a resistência mecânica tanto a flexão como a compressão, chegando a valores interessantes, e de bom desempenho no grupo de composições (2), a medida que a percentagem de aditivo aumentava o valor de resistência mecânica tanto a compressão como a flexão também aumentavam. De igual modo a capilaridade obteve bons valores.

Analizou-se o módulo de young através do pundit, e verificou-se que a medida que a percentagem de diatomite aumenta o material fica menos denso, logo, o módulo de young diminui, isto devido a finura do material, e a grande superfície específica. No que diz respeito ao metacaulino não houve grandes variações.

Uma utilização com percentagens elevadas de diatomites, que neste caso foi de 50%, demonstram “in situ” maus resultados, devido a grande finura do material, proporcionando uma enorme retractibilidade, deste modo e como já mencionado, as percentagens ideais de diatomite deverão estar abaixo de 50%. No que diz respeito ao metacaulino demonstrou “in situ” bons resultados.

Resumindo, a diatomite garante enormes potencialidades como aditivo de argamassas de reabilitação e o metacaulino desempenhou um bom papel nas composições estudadas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Leitão, Dinis; Instituto Piaget, Departamento de Engenharia Civil Campus de Mirandela,5370-202 Mirandela, Portugal; Almeida, Manuela; Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil Campus de Azurém,4800-058 Guimarães, Portugal - Metodologia para a Implementação de Check Lists em Intervenções de Reabilitação.
2. L nec – REPAR 2000 – Encontro Nacional Sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas. 1ª Edição. Lisboa, LNEC, (2000)
3. Aguiar, José; Cabrita, A. M. Reis; Appleton, João. – Guião de Apoio à Reabilitação de Edifícios Habitacionais. 5.ª Edição, vol.1, Lisboa, LNEC, (2001).
4. Tavares, Martha V. UMA METODOLOGIA DE ESTUDO PARA A CONSERVAÇÃO DE REBOCOS ANTIGOS - O RESTAURO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE CONSOLIDAÇÃO,Restauradora, Doutoranda em Arquitectura, Estagiaria de Investigação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal, marthal@l nec.pt
5. Aguiar, José, UMA METODOLOGIA DE ESTUDO PARA A CONSERVAÇÃO DE REBOCOS ANTIGOS - O RESTAURO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE CONSOLIDAÇÃO,Restauradora, Arquitecto, Doutor em Conservação e Restauro, Investigador Auxiliar do LNEC, Lisboa, Portugal. jaguiar@l nec.pt
6. Veiga, Rosário, UMA METODOLOGIA DE ESTUDO PARA A CONSERVAÇÃO DE REBOCOS ANTIGOS - O RESTAURO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE CONSOLIDAÇÃO,Engenheira Civil, Doutora em Engenharia Civil, Investigadora Principal do LNEC, Lisboa, Portugal. rveiga@l nec.pt
7. Veiga, M. Rosário, TAVARES, Martha. Características das paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura. Actas do Encontro A indústria das tintas no início do século XXI. Lisboa, APTETI, Outubro de 2002.
8. Aguiar, José; TAVARES, Martha; VEIGA, Mª do Rosário. Consolidação de revestimentos exteriores (Rebocos e barramentos) de edifícios antigos- reflexões para um plano de estudo, Lisboa, LNEC, Relatório 216/2001 – NA.
9. Veiga, M. Rosário – Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes. Actas do 3º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. Lisboa, LNEC, Maio de 2003.

10. Velosa, A. L. (2006): Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas, 2006 (Doutoramento em Engenharia Civil) – Universidade de Aveiro.
11. Veiga, M. Rosário; TAVARES, Martha – Características das paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura. Actas do Encontro *A indústria das tintas no início do século XXI*. Lisboa, APTETI, Outubro de 2002.
12. Veiga, M. Rosário; Aguiar, José - DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE INTERVENÇÃO EM REVESTIMENTOS DE EDIFÍCIOS ANTIGOS
13. Jalali, S. - 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., 1991
14. Neville, A. M. (1997) Propriedades do concreto. Trad. Giammusso, S. E.. 2a ed., São Paulo: Editora Pini, 828 p.
15. Aguiar, José; Cabrita, A. M. Reis; Appleton, João. – Guião de Apoio à Reabilitação de Edifícios Habitacionais. 5.ª Edição, vol.1, Lisboa, LNEC, (2001).
16. Sá, Abel; - ARGAMASSA DE CAL AÉREA HIDRATADA COM INCORPORAÇÃO DE GORDURA E SUA UTILIZAÇÃO EM REBOCOS; NOVEMBRO 2002
17. Leonardo PAES MOTHÉ; - AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES IDEAIS PARA A PRODUÇÃO DE METACAUINITA ATRAVÉS DA ANÁLISE DA SUA ATIVIDADE POZOLÂNICA; UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ SETEMBRO – 2004
18. Guilherme Chagas Cordeiro;- CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM METACAUINITA; UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ AGOSTO – 2001
19. Veiga, M. Rosário – As argamassas na conservação. In Actas das 1^{as} Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Avaliação e Reabilitação das Construções existentes. Aveiro, 26 de Novembro de 2003. Conferência convidada. Coleção Comunicações, COM 103, LNEC, Lisboa 2003.
20. Bauer, L.F., “Materiais de Construção 1” 4ª Ed., Rio de Janeiro, Brasil, 1992.
21. Coutinho, Joana de Sousa; Departamento de Engenharia Civil MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO 2 1ª PARTE – LIGANTES E CALDAS 2002 actualização 2006
22. Velosa, A. L. (2006): Argamassas com pozolanas para aplicação na conservação de edifícios, 2006 (Doutoramento em Engenharia Civil) – Oficina Técnicas Tradicionais de Revestimento Beja 20/09/2007 - Universidade de Aveiro.

23. Curcio, F., de Angelis, B. A., Pagliolico, S. (1998) *Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars*. Cement and Concrete Research, V. 28, N. 6, pp. 803 – 809.
24. Frías, M., Cabrera, J. (2000) Pore distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes. Cement and Concrete Research, V. 30, pp. 561 – 569.
25. Ramlochan, T., Thomas, M., Gruber, K. A. (2000) *The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete*. Cement and Concrete Research, V. 30, pp. 339 – 344.
26. Wild, S., Khatib, J. M., Jones, A. (1996 a) *Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete*. Cement and Concrete Research, V. 26, N. 10, pp. 1537 – 1544.