

A Cal na Construção

Ana Zulmira Gomes Coelho

F. Pacheco Torgal

Said Jalali



Universidade do Minho

Guimarães 2009

A Cal na Construção

Ana Zulmira Gomes Coelho

F. Pacheco Torgal

Said Jalali

Edição
TecMinho

Arranjo Gráfico
Andrea Mota

ISBN
978-972-99179-8-1

Impressão
Publidisa

DELEGACIÓN PORTUGAL

Av. 5 de Outubro 10

Tel.: (+351) 21 350 70 00

Fax.: (+351) 21 353 41 94



Universidade do Minho

Prefácio

O bom conhecimento dos materiais de construção é um requisito fundamental para promover quer a qualidade quer mesmo a sustentabilidade da indústria da construção. Contudo a formação académica ao nível dos cursos de engenharia civil tem dado muito mais relevo a outras questões como o cálculo estrutural e outro, relegando para um plano secundário a abordagem do conhecimento dos materiais de construção.

De acordo com as últimas estatísticas o nosso país possui aproximadamente 5,5 milhões de edifícios, sendo que destes 500.000 se encontram desocupados, a problemática da reabilitação assume neste contexto uma importância crucial. No caso dos materiais de construção um tal cenário vem reposicionar o seu papel, porquanto implica um conhecimento mais profundo das suas propriedades, do seu comportamento ao longo do tempo e da compatibilidade entre diferentes materiais. De facto a utilização do cimento em obras de reabilitação de forma indiscriminada e pouco criteriosa tem sido responsável por inúmeros insucessos. Relegada para um papel secundário, desde o aparecimento do cimento há quase um século, a cal retoma assim actualmente uma importância que conheceu desde os primórdios da civilização humana.

Nesse sentido o presente trabalho pretende contribuir ainda que de forma modesta para sintetizar um conjunto de informações técnicas e científicas sobre a cal de construção, as quais se pensa poderem ser úteis quer aos estudantes quer aos técnicos que diariamente lidam com este material. O trabalho encontra-se estruturado em vários capítulos, nos quais se destacam os dois últimos, versando respectivamente sobre as propriedades e a durabilidade das argamassas de cal, como também sobre a importância da cal na reabilitação de edifícios. Faço por isso votos para que o presente trabalho, possa ser útil aos seus leitores e contribuir para uma construção com mais qualidade.

Said Jalali
Universidade do Minho

ÍNDICE

<i>Prefácio</i>	5
1 A Cal	10
Enquadramento Histórico	11
Tipos de Cal de Construção	17
2 Produção da Cal	22
Processo de fabrico	23
Cal Aérea	30
Cal Hidráulica	33
Normalização	35
Fornecimento, Recepção e Armazenamento	37
3 Requisitos da Cal	39
Requisitos Físicos e Mecânicos	40
Requisitos Químicos	45
4 Aplicações da Cal	47
Argamassas e Betões	48
Pinturas	51
Estabilização de Solos	53
Blocos de Terra Comprimidos (BTC)	59
Revestimentos Betuminosos	66
5 Argamassas com Cal: Propriedades e Durabilidade	68
Endurecimento	69
Trabalhabilidade	72
Retenção de Água	75
Retracção	76
Resistência à compressão	79
Ductilidade	81

Módulo de Elasticidade	82
Porosidade, Capilaridade e Permeabilidade ao Vapor de água	84
Resistência à Acção de Sais Solúveis	88
6 A Cal na Reabilitação de Edifícios	90
Considerações Gerais	91
Caracterização das Argamassas Antigas	94
Argamassas de Restauro à base de Cal	106
6 Referências	117
7 Índice de Figuras	126
8 Índice de Tabelas	130

1

A Cal

Enquadramento Histórico
Tipos de Cal de Construção

Enquadramento Histórico

O homem terá descoberto a cal, possivelmente, no início da Idade da Pedra – no Período Paleolítico (Silva, 2006). Existem indícios da utilização da cal em algumas zonas da actual Turquia que remontam a um período entre 12000 a 5000 A.C (Miller, 1999; Elsen, 2006). Ruínas com solo argiloso estabilizado com cal, foram encontradas na construção da Pirâmide de Shersi no Tibet que datam de 5000 A.C. Alguns autores referem casos concretos de utilização da cal que datam de 4000 A.C (Boynton, 1980; Zacharopoulou, 1998). Análises feitas nos materiais utilizados no revestimento das câmaras da Pirâmide de Quéops e nas juntas dos blocos de calcário e granito da Pirâmide de Quéfren também revelaram a presença de cal (Cowan, 1977; Guimarães, 2002) (Figura 1.1).



Figura 1.1: Pirâmides de Quéops e Quéfren (2600 – 2550 A.C.)

Por volta de 1500 A.C. a violenta erupção do vulcão Thera que destruiu parte da ilha Santorini (Figura 1.2), foi responsável pelo aparecimento de vastas quantidades de cinzas. Alguns autores estimam que a quantidade de cinzas expelida nesse evento vulcânico possa ter sido da ordem dos 60 Km cúbicos.



Figura 1.2: Vista actual do arquipélago de Santorini

Esta matéria-prima foi oportunamente utilizada pela civilização grega na confecção de argamassas que revelaram possuir propriedades hidráulicas, facto que se revelou determinante no desenvolvimento da actividade portuária da Civilização Grega. Alguns autores citam o Grego Teofrasto (Séc. III A.C.) que descreve a utilização de cal viva na execução de alvenarias *“a cal é utilizada na construção, sendo espalhada pela pedra...os operários depois de a picarem e de lhe deitarem um pouco de água, remexem-na com paus, pois não podem faze-lo com as mãos por causa do calor”* (Ribeiro & Lopes, 2007). O próprio Vitruvius elogia na sua conhecida obra (Tratado de Arquitectura) as argamassas feitas pelos Gregos pois *“nem a água as dissolvía, nem as ondas as quebravam”* (Alvarez, 2007). Também os chineses recorreram ao uso de argamassas de cal durante a construção da Grande Muralha da China que se estende por 3640 Km (Figura 1.3).



Figura 1.3: Grande muralha da China (700 – 500 A.C)

Alguns autores referem descrições sobre o fabrico da cal na Civilização Romana, “este será o sinal que indica que a cal já está cozida: as pedras que estão por cima devem estar queimadas e as do fundo, já cozidas, começam a cair além disso o lume do fogo deitará menos fumo” (Ribeiro e Lopes, 2007). Os mesmos autores, citam recomendações sobre a necessidade de intercalar pedra calcária e material combustível a fim de se conseguir uma cozedura mais homogénea. Foram ainda os Romanos que desenvolveram as primeiras grandes aplicações da cal em geotecnia, nomeadamente com o objectivo de procederem à secagem dos terrenos e à aplicação de um ligante de fixação das lajes às plataformas, por onde passavam algumas das suas monumentais estradas, como foi o caso da construção da Via Ápia (Figura 1.4).

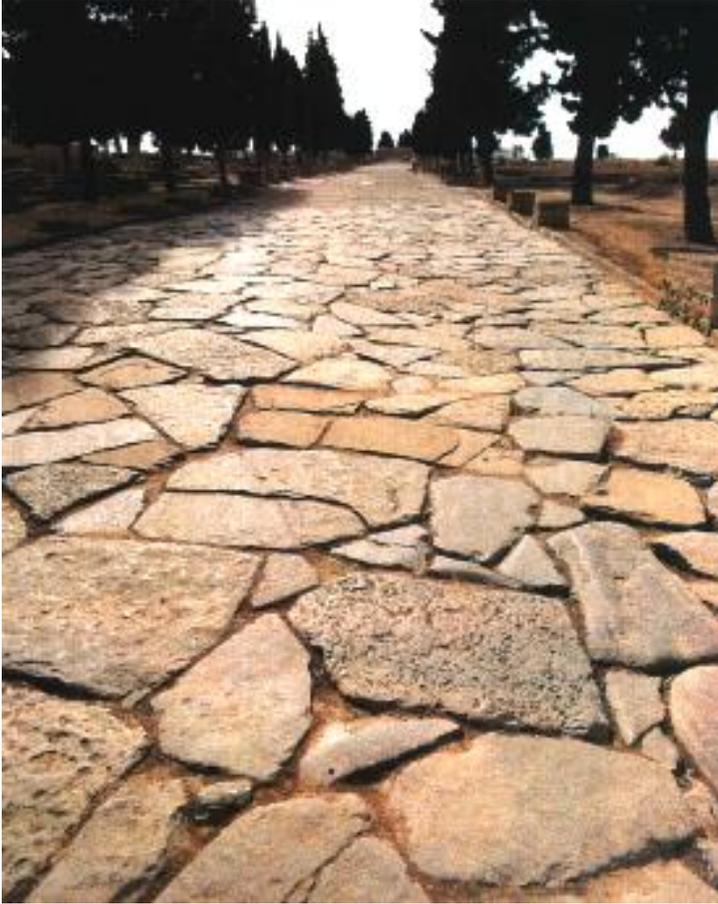


Figura 1.4: Via Ápia (350 A.C.)

A actividade vulcânica do Vesúvio cuja violenta erupção de 79 D.C. cobriu com um manto de cinzas, com 2 a 7 metros de espessura, as cidades de Pompeia e Herculano, contribuiu com pozolanas naturais em abundância para o fabrico de argamassas romanas. Contudo os Romanos já conheciam a influência das pozolanas artificiais (*testa e carbunculus*), no bom desempenho das argamassas, não estando por isso as suas obras condicionadas à abundância local de pozolanas naturais, como acontecia em locais do Império Romano, longe de qualquer actividade vulcânica. Vitruvius refere a este propósito, “a utilização de cerâmica cozida em forno, moída e passada em crivo” no sentido da obtenção de argamassas resistentes e duráveis (Margalha, 2008). Obras como o Coliseu, o Panteão ou o aquedutos *Pont du Gard* (no Sul de França), espelham bem a durabilidade das argamassas Romanas à base de cal e de pozolanas (Figuras 1.5 - 1.7).



Figura 1.5: Pont du Gard (20 A.C.)



Figura 1.6: Coliseu de Roma (70-80 D.C.)

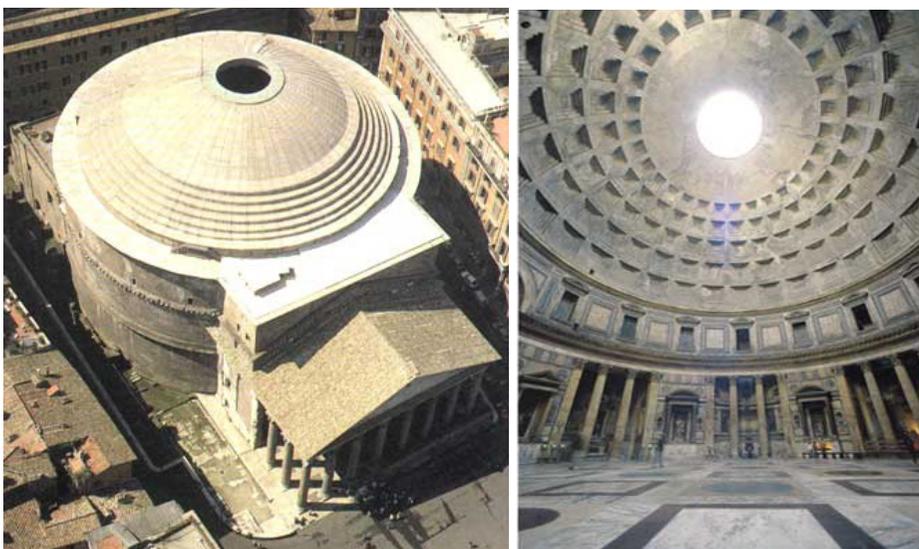


Figura 1.7: Panteão de Roma e vista do seu interior (118-125 D.C.)

A partir do fim do Império Romano e durante a Idade Média o uso de argamassas à base de cal irá vulgarizar-se. No entanto o custo de produção daquele ligante irá reflectir-se na execução de argamassas com menor quantidade deste ligante e logo com menor qualidade. No séc. XVIII assiste-se à instauração dos Califados árabes na Península Ibérica cujas técnicas construtivas introduzem na Europa as argamassas à base de gesso (Alvarez *et al.*, 2005).

A partir dessa altura passam a utilizar-se argamassas à base de gesso e cal com aditivos variados onde se destacam as gorduras vegetais e animais. A utilização do gesso em conjunto com a cal permitia por um lado reduzir a retracção associada à cal e por outro lado aumentar o baixo tempo de presa que está associado ao gesso.

Até ao sec. XX, a cal adicionada a pozolanas ou ao gesso, constituiu o ligante mais utilizado ao nível da construção civil. Contudo com a descoberta do cimento portland a utilização da cal na construção entrou em declínio, porquanto o novo ligante endurecia mais rapidamente permitindo o encurtamento dos prazos das obras e apresentava além disso desempenhos mecânicos muito superiores aos das argamassas à base de cal.

Mais recentemente, tem-se vindo a constatar que o cimento portland não é afinal a receita milagrosa que inicialmente se pensava ser, sendo inclusive responsável por vários problemas nomeadamente ao nível da reabilitação de edifícios, onde são frequentes as patologias associadas ao facto da sua utilização ser quimicamente incompatível com argamassas à base de cal, ser também responsável pela introdução de sais solúveis, ser pouco permeável e apresentar um elevado módulo de elasticidade, que é incapaz de acomodar as deformações das alvenarias. As argamassas à base de cal ganham assim neste contexto e neste campo particular uma nova actualidade que importa compreender e fomentar.

Tipos de Cal de Construção

Segundo a Norma NP EN 459-1:2002, pode-se definir cal como um material abrangendo quaisquer formas físicas e químicas, sob as quais pode aparecer o óxido de cálcio (CaO), o óxido de magnésio (MgO) e ou hidróxidos de cálcio e magnésio (Ca(OH)_2 e Mg(OH)_2). De acordo com a referida norma, existem diferentes tipos de cal de construção, destacando-se nestes a cal aérea e a cal hidráulica (Paulo, 2006) (Figura 1.8).

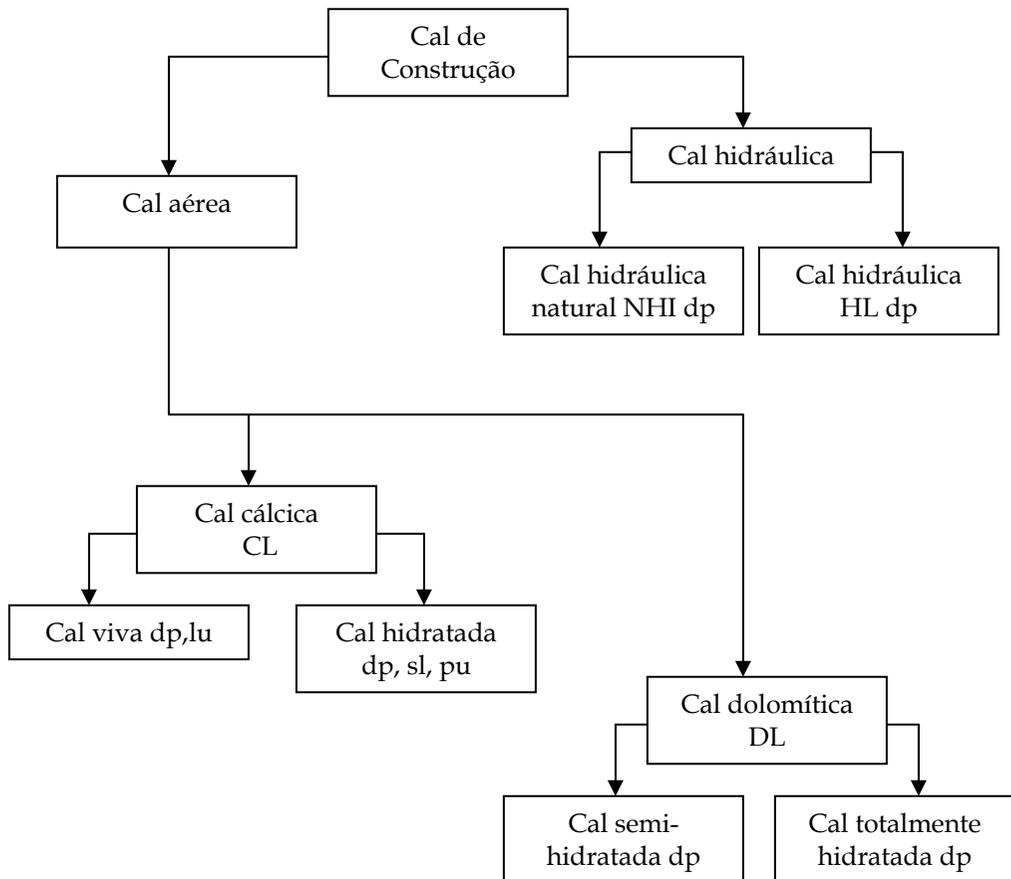


Figura 1.8: Tipos de cal de construção (NP EN 459-1:2002)

Em que:

dp (pó seco); sl (leite ou calda de cal); lu (cal viva em pedaços); pu (pasta de cal).

Cal Aérea: cal obtida a partir de calcários puros, i.e., carbonato de cálcio (CaCO_3), com teor de impurezas inferior a 5%, ou carbonato de cálcio e magnésio. A cal aérea é constituída principalmente por óxido ou hidróxido de cálcio a qual endurece lentamente ao ar por reacção com o dióxido de carbono atmosférico. Esta cal não ganha presa dentro da água, visto não ter propriedades hidráulicas. Apresenta-se na forma de cal viva ou de cal hidratada.

Cal Viva (Q - Quicklime): cal aérea constituída, essencialmente, por óxido de cálcio e por óxido de magnésio (CaO e MgO). A cal viva é produzida através da calcinação de rocha calcária e/ou de dolomite e apresenta uma reacção exotérmica quando em contacto com a água. A cal viva pode encontrar-se sob a forma de cal cálcica ou de cal dolomítica.

Cal Hidratada (S - slaked lime): cal aérea, cálcica ou dolomítica, provenientes da extinção de cais vivas. São produzidas sob a forma de pó seco, em pasta ou em calda (leite de cal).

Cal Cálcica (CL): cal constituída, principalmente, por óxido de cálcio ou por hidróxido de cálcio, sem quaisquer adições de materiais hidráulicos ou pozolânicos.

Cal Dolomítica (DL): cal constituída principalmente por óxido de cálcio e por óxido de magnésio ou por hidróxido de cálcio e por hidróxido de magnésio, sem quaisquer adições de materiais hidráulicos ou pozolânicos.

Cal Hidráulica Natural (NHL): cal constituída principalmente por hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. A cal hidráulica possui a propriedade de ganhar presa e endurecer debaixo de água. O dióxido de carbono atmosférico também contribui para o seu endurecimento por reacção com o hidróxido de cálcio.

Cal Hidráulica Natural com Material Adicional (Z): produto que pode conter materiais pozolânicos ou hidráulicos apropriados, adicionados até 20% em massa.

Cal hidráulica (HL): cal constituída principalmente por hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. A cal hidráulica possui a propriedade de ganhar presa e endurecer debaixo de água. O dióxido de carbono atmosférico também contribui para o seu endurecimento por reacção com o hidróxido de cálcio. Nalguns países é também designada cal hidráulica artificial.

A cal hidráulica difere da cal aérea por ser obtida de calcários não puros, i.e, com percentagens variáveis de argilas (Tabela 1.1).

Tabela 1.1: Classificação de calcários de acordo com o teor de carbonato de cálcio (Sequeira *et al.*, 2007)

Tipo de calcário	% de CaCO_3
Calcário Rico	96 - 100
Calcário Margoso	90 - 96
Marga Calcária	75 - 90
Marga	40 - 75
Marga Argilosa	10 - 40
Argila Margosa	4 - 10
Argila	0 - 4

Vicat definiu o índice de hidraulicidade, como a quantidade de óxidos das argilas (SiO_2 , Al_2O_3) sobre a quantidade de óxidos presentes nos calcários (CaO). Mais recentemente o índice de hidraulicidade foi definido como o quociente entre a quantidade de óxidos das argilas (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) e a quantidade de óxidos presentes nos calcários ($\text{CaO} + \text{MgO}$) (Aguiar, 2007).

Geralmente, as variedades de cal aérea classificam-se relativamente à sua composição química básica e ao respectivo rendimento em pasta.

De acordo com a composição química, a cal pode apresentar-se sob duas formas: a cal cálcica e a cal magnésiana (ou dolomítica). A primeira, com um mínimo de 75% de CaO, e a segunda, com um mínimo de 20% de MgO, devendo sempre a soma de CaO com MgO ser superior a 95%. Os componentes argilosos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ devem somar no máximo 5%. A proporção residual de CO₂ deve ser inferior a 3%, quando a amostra é retirada do forno de calcinação, e inferior a 10%, quando é retirada de outro local.

Enquanto as cais aéreas são classificadas de acordo com o seu teor de (CaO + MgO), as cais hidráulicas classificam-se de acordo com a sua resistência mínima de compressão aos 28 dias. Uma cal cálcica é referenciada pelas letras CL, já uma cal dolomítica aparece associada às letras DL (Tabela 1.2).

Tabela 1.2: Tipos de cal utilizadas na construção de acordo com a hidráulicidade (NP EN 459 - 1: 2002)

Hidraulicidade	Designação	Notação
Não hidráulicas	Cal Cálcica 90	CL 90
	Cal Cálcica 80	CL 80
	Cal Cálcica 70	CL 70
	Cal Dolomítica 85	DL 85
	Cal Dolomítica 80	DL 80
Hidráulicas	Cal Hidráulica 2	HL 2
	Cal Hidráulica 3,5	HL 3,5
	Cal Hidráulica 5	HL 5
	Cal Hidráulica Natural 2	NHL 2
	Cal Hidráulica Natural 3,5	NHL 3,5
	Cal Hidráulica Natural 5	NHL 5

Segundo o critério do rendimento em pasta, a cal apresenta duas variedades: a cal gorda e a cal magra. O rendimento em pasta define o volume de pasta de cal obtido com uma tonelada de cal viva. Essa pasta é uma suspensão do tipo coloidal, obtida na operação de extinção da cal viva. Do ponto de vista económico, é essencial o conhecimento do rendimento em pasta, pois o

produto comprado é a cal viva e o produto utilizado é a pasta de cal e esta é o ligante realmente utilizado em construção.

Vários factores, como por exemplo a presença de impurezas, o sobrecozimento ou o subcozimento têm influência no rendimento da cal. Se o rendimento em pasta for superior a 1.82, a cal denomina-se como gorda. Se for menor que esse valor, designa-se por magra. Este rendimento-limite equivale ao rendimento de 1.82 m³ de pasta, para uma tonelada de cal viva (550 kg de cal viva para 1 m³ de pasta) (Bauer, 1987).

A cal gorda, que deriva de calcários quase puros (com percentagem superior a 99% de carbonatos), tem cor branca, presa lenta e é pouco resistente aos agentes atmosféricos. A designação de “*gorda*” advém das suas propriedades plásticas, pois trata-se de uma cal facilmente trabalhável e bastante macia. A cal magra, que deriva de calcários que contêm 1% a 5% de argila ou de outras impurezas, é de cor parda (acinzentada) e presa rápida. Esta, não é tão fácil de trabalhar nem tão macia. De um modo geral, a cal magnésiana é considerada magra (Coutinho, 2006).

2

Produção da Cal

Processo de Fabrico

Cal Aérea

Cal Hidráulica

Normalização

Fornecimento, Recepção, Armazenamento

Processo de Fabrico

Após a extracção da jazida, a pedra calcária é transportada até à fábrica para ser submetida a um processo de britagem. De seguida, pode ser moída e embalada para comercialização, ou pode levar-se até ao forno de calcinação para ser transformada. Após a calcinação, a cal pode ser moída e comercializada na forma de cal virgem, ou pode ainda sofrer um processo de hidratação e ser finalmente comercializada (Figura 2.1).

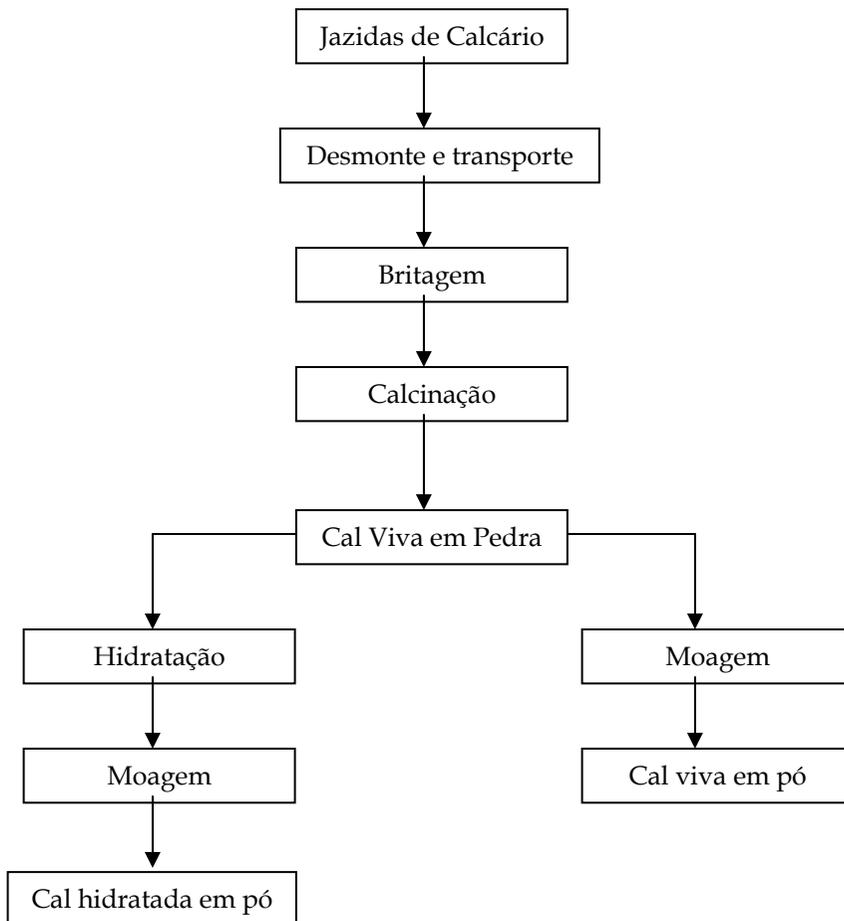


Figura 2.1: Sequência do fabrico da cal

Matéria-Prima

A matéria-prima, a partir da qual se obtêm os produtos à base de cal, é a pedra calcária, composta quase exclusivamente por carbonato de cálcio (CaCO_3) e por um certo número de outros constituintes em quantidade mais ou menos variável. Para se produzir cal aérea de boa qualidade, é necessário que o calcário utilizado seja o mais puro possível, isto é, deve apresentar uma elevada percentagem de carbonato de cálcio. A sílica e os óxidos de ferro e de alumínio são as impurezas que acompanham os carbonatos, em maior ou menor grau, na constituição das rochas calcárias. Nestas rochas, o carbonato de cálcio é, frequentemente, substituído, em determinada proporção, pelo carbonato de magnésio que não constitui uma impureza propriamente dita (Coutinho, 2006).

Em Portugal, as reservas de pedra calcária localizam-se no Maciço Estremenho da Serra dos Candeeiros no Concelho de Santarém, nos Maciços Calcários de Souselas e de Brasfemesa a cerca de 10 Km de Coimbra. Existe ainda a Pedreira de Calcário da região de S. Brás de Alportel, no Algarve, e outros afloramentos de menor expressão.

Extracção e Desmonte

A extracção da rocha calcária pode ser feita a céu aberto ou em galeria, através da exploração de jazidas de calcário. Para que a extracção do calcário seja de alta qualidade, há que efectuar primeiramente um rigoroso processo de selecção do calcário e uma limpeza total da rocha, para que se alcancem as características físicas e químicas necessárias às diversas aplicações da cal. Depois de limpa, a rocha é perfurada e o pó expelido é recolhido para a realização das análises em laboratório. Verificada a qualidade do material, faz-se o desmonte da rocha, por meio de detonação com recurso a explosivos. A rocha desmontada é levada para uma britagem primária, onde é feita a selecção, por meio de peneiros vibratórios, da pedra destinada aos diversos produtos (Figura 2.2).

De acordo com a sua composição química (quando apresenta alta pureza em termos de CaCO_3), a pedra é depois ser levada até aos fornos para calcinação. A pedra calcinada segue depois para britagem, para ficar com a granulometria necessária, e em seguida passa novamente por um peneiro, onde são retiradas as possíveis impurezas.



Figura 2.2: Extração de pedra calcária para fabrico da cal

Fornos de Calcinação

A calcinação da pedra calcária para produção da cal, pode efectuar-se em instalações rudimentares ao ar livre. Na calcinação ao ar livre, em fornos de campanha, faz-se a escavação de um poço no terreno e acumulam-se os fragmentos de calcário no seu interior, formando o volume de uma fornalha na sua parte interior. As pedras maiores são colocadas em forma de abóbada e o resto é cheio com pedras de menor dimensão. O combustível normalmente utilizado é a lenha (Bauer, 1987).

Na calcinação ao ar livre por camadas, faz-se uma escavação de um metro no chão, em forma de tronco de cone invertido, de cerca de cinco metros de diâmetro na base superior e um metro na base inferior. Colocam-se camadas horizontais alternadas de carvão vegetal e pedras calcárias, de forma que o carvão vá diminuindo de espessura de baixo para cima, e a pedra calcária, ao contrário (Figura 2.3).

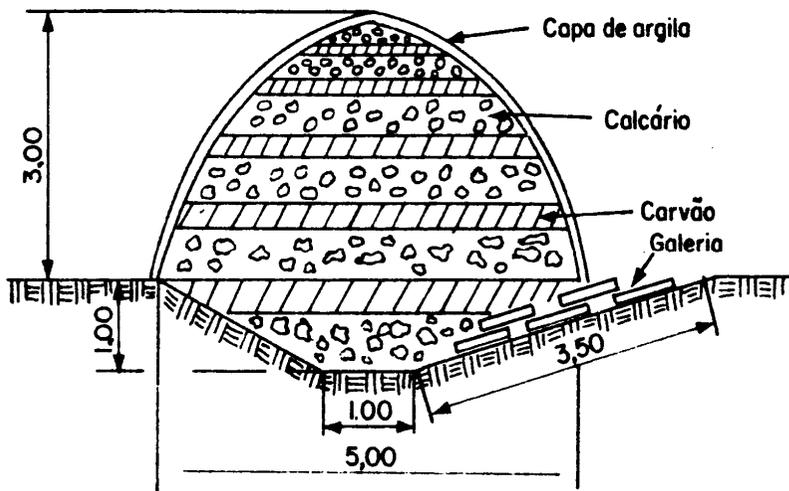
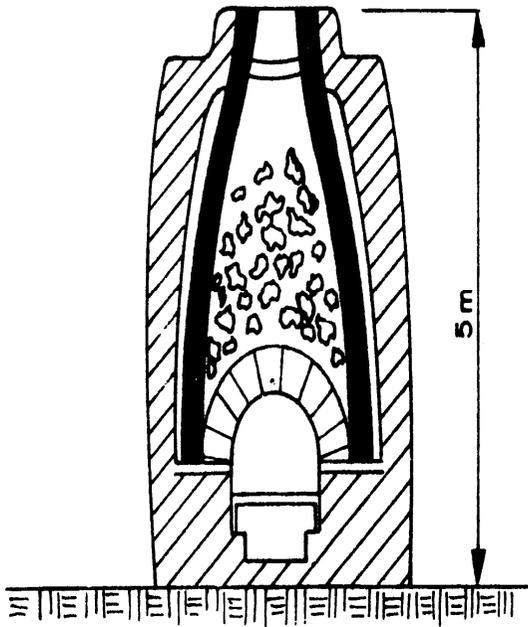


Figura 2.3: Forno de campanha para cal (Bauer, 1987)

Forma-se um volume de cerca de três metros de altura, em forma tronco-cónica, que é coberto por uma camada de barro, areia e palha, de cerca de seis centímetros de espessura, de modo a evitar a perda de calor. Acende-se o fogo e a calcinação dura uma semana. Finalmente, depois de arrefecido, separa-se a cal viva das cinzas .

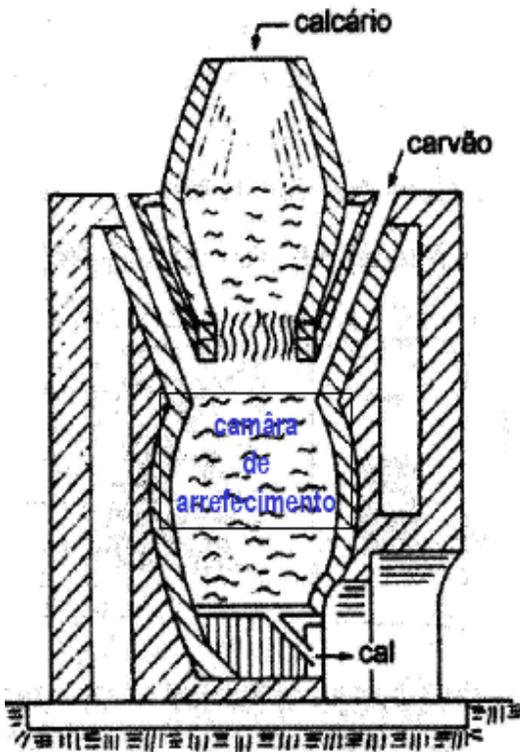
A calcinação do calcário pode também ser feita com recurso a fornos intermitentes. Estes são geralmente feitos em tijolo e compreendem normalmente três regiões: a “casa”, o “estômago” e a chaminé. Os fornos intermitentes têm uma secção circular de 5 m de altura, em forma oval, tanto na horizontal como na vertical. A casa é formada por uma abóbada com as pedras mais grossas e o resto é cheio com pedra calcária esmagada. O combustível normalmente utilizado é a lenha, sendo que o processo de calcinação dura de três a quatro dias, de acordo com a capacidade do forno (Figura 2.4).



Este tipo de forno apresenta os mesmos inconvenientes que os fornos de campanha, especialmente no que se refere ao trabalho intermitente, que obriga a um maior consumo de combustível e mais mão-de-obra que a necessária para a calcinação em fornos contínuos. A capacidade destes fornos varia entre 6 e até mais de 50 toneladas.

Figura 2.4: Forno intermitente

A calcinação dos calcários pode ainda ser levada a cabo em fornos contínuos, sendo que estes podem ser verticais ou horizontais. Dentro dos primeiros ainda existe uma diferença, tendo em conta os diferentes tipos de combustíveis a utilizar. Assim, podem ser de chama curta quando é utilizado, por exemplo, o carvão-coque, ou são de chama longa quando utilizam a lenha como combustível (Figura 2.5).



Este tipo de forno consta de duas câmaras sobrepostas, sendo o calcário alimentado pela abertura junto à chaminé superior e o combustível introduzido no estrangulamento entre as duas câmaras, onde se processa a combustão. O arrefecimento do material ocorre na câmara inferior, onde o ar necessário à combustão é aquecido, com melhoria evidente para o rendimento térmico. O material calcinado é extraído pela parte inferior da câmara de arrefecimento (Coutinho, 2006).

Figura 2.5: Forno contínuo vertical a carvão

Os fornos rotativos constam de um cilindro metálico revestido com material refractário e rodam lentamente sobre um eixo ligeiramente inclinado, recolhendo o calcário pela sua parte superior. Na parte inferior encontra-se um maçarico de aquecimento, por onde é retirado o material calcinado.

Estes fornos têm a desvantagem de exigir que a pedra calcária seja antecipadamente reduzida a grãos de pequeno tamanho originando, conseqüentemente, um produto pulverizado, de difícil colocação no mercado, e obrigando à continuação do processo industrial na hidratação da cal viva, transformando o produto final na variedade hidratada (Figura 2.6).

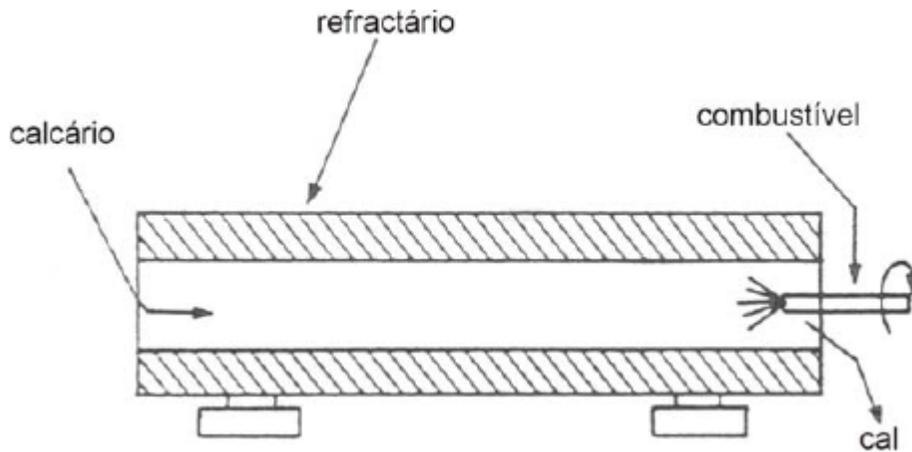


Figura 2.6: Forno contínuo vertical a carvão

O processo de calcinação condiciona de forma determinante as propriedades da cal, podendo nos casos em que não haja um controle rigoroso da temperatura resultar em cristais de cal insolúveis (excesso de temperatura) ou em cristais com o seu interior carbonatado por falta de calor (Figura 2.7).

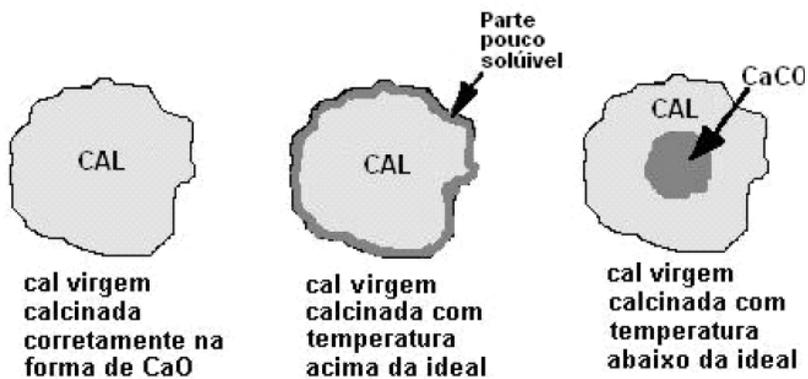


Figura 2.7: Influência da temperatura de calcinação (Paiva et al., 2007)

Cal Aérea

A cozedura do calcário puro a uma temperatura entre 800 e 900 °C origina o óxido de cálcio, também designado cal viva e que constitui a cal aérea.

A cal viva apresenta-se sob a forma de grãos de diferentes tamanhos 15 ou 20 cm, de cor branca e amorfa. Apresenta uma estrutura porosa e formas idênticas às dos grãos da rocha original. A cal viva é ávida de água e quando se mistura com ela, dá origem à cal apagada, libertando grande calor durante a reação e provocando também um aumento de volume que chega a atingir 3 a 3.5 vezes o seu volume inicial. Se durante o processo de extinção utilizarmos apenas a quantidade de água estritamente necessária, a cal apagada resultante aparece sob a forma de pó.

A operação de hidratação é denominada por extinção (ou apagamento) e o hidróxido resultante designa-se por cal extinta ou hidratada. Este fenómeno é exotérmico, isto é, há uma grande libertação de calor, o que torna o processo altamente perigoso. A extinção pode ser executado através de qualquer um dos seguintes métodos:

Extinção espontânea: conseguida pela captação apenas da humidade do ar, o que tem por inconveniente ser um processo muito lento, não extinguir completamente a cal viva, além do risco de absorver o dióxido de carbono;

Extinção por aspersão: rega-se com 25% a 50% de água, cobrindo-se a cal com areia, tendo contudo o inconveniente da extinção não ser completa;

Extinção por imersão: fragmenta-se a cal viva em fragmentos de tamanho não superior a uma polegada, colocando-a em cestos e mergulha-se em água (este é um dos métodos mais usados em Portugal) até o material entrar em efervescência, nessa altura é colocada em barris tapados;

Extinção por fusão: lançamento da cal viva em tanques onde era colocada uma determinada quantidade de água, calculada para não prejudicar a qualidade do produto final. A mistura era “*mexida*” para se obter uma mistura homogênea e depois coada para outro recipiente com o auxílio de uma grelha para retirar os fragmentos não extintos. A cal é depois deixada coberta de água num período nunca inferior a uma semana, ou 3 meses no caso de se tratar de cal para acabamentos, em determinados casos esse período poderia chegar mesmo até 5 anos (Santiago, 2000);

Extinção em autoclaves: é um dos métodos que conduz a produtos de melhor qualidade (a extinção é completa) sendo muito utilizado nos E.U.A.

As cals extintas são cals aéreas constituídas, principalmente, por hidróxido de cálcio e, por vezes, contendo hidróxido de magnésio. Estas por sua vez, não apresentam uma reacção exotérmica quando em contacto com a água. São produtos que se apresentam sob a forma de pó seco ou em misturas aquosas (pasta de cal – “*lime putty*” - ou leitada de cal).

Vantagens e Limitações

A cal hidratada é um dos principais elementos das argamassas, porque promove benefícios para a edificação. Ela tem um excelente poder aglomerante, capaz de unir os grãos de areia das argamassas. Presentemente, com o emprego de aditivos, a cal tem deixado de ser usada em muitos casos.

Por causa da sua elevada leveza e finura de seus grãos e conseqüente capacidade de proporcionar fluidez, coesão e retenção de água, a cal hidratada melhora a qualidade das argamassas. As suas partículas muito finas, ao serem misturadas com água, funcionam como um verdadeiro lubrificante, reduzindo o atrito entre os grãos de areia. O resultado é uma maior plasticidade da argamassa, proporcionando melhor trabalhabilidade e, conseqüentemente, maior produtividade, com a redução do custo do m³.

Além disso, permite também que as argamassas tenham maiores deformações, sem fissuração, do que teriam somente com cimento Portland. Outra propriedade importante, no estado fresco da cal, é a retenção de água por não permitir a sucção excessiva de água pelo suporte. Assim, as argamassas de cimento, contendo cal, retêm mais água de amassadura e garantem resistência suficiente quanto à compressão e à aderência, tanto para assentamentos como para revestimentos.

Por ser um produto alcalino, a cal hidratada impede a oxidação nas ferragens e, também por ter essa característica, actua como agente bactericida e fungicida. Além disso, evita que se formem manchas e o apodrecimento precoce dos revestimentos; proporciona economia de tinta, pois permite acabamento mais liso e de cor clara; é compatível com qualquer tipo de tinta e outros acabamentos, como fórmica, lambris, papéis de parede, se respeitado o tempo mínimo de cura de 28 dias.

A adição de cal hidratada a argamassas de cimento reduz significativamente o módulo de elasticidade, sem afectar, na mesma proporção, a resistência à tracção que, em última análise, é a máxima resistência de aderência da argamassa. Assim, as argamassas com cal absorvem melhor as pequenas movimentações das construções evitando, fissuras e até o levantamento (ou queda) dos revestimentos, aumentando a vida útil do revestimento.

A cal hidratada é utilizada no fabrico de argamassas para assentamento de alvenarias contudo, se for usada sem outro ligante ou aditivo perde qualidades em presença da água.

A extinção da cal viva dá-se com o aumento de volume, por fixação de moléculas de água. Isto é um inconveniente nas argamassas hidráulicas e cimentos onde ela aparece sempre, pois há uma parte de CaO que não desaparece completamente e que ao extinguir-se dá origem a expansões. Se a

cal se extingue depois de o cimento endurecer, como ela aumenta de volume, pode provocar fissuras no cimento

Cal Hidráulica

A cal hidráulica é fabricada por processos semelhantes aos do fabrico da cal comum. Obtém-se por cozedura de calcários margosos (8 a 20% de argilas), a temperaturas entre os 1000 °C e os 1500 °C, preferencialmente em fornos contínuos verticais de alvenaria e revestimento refractário. Deste processo, obtém-se óxido de cálcio, silicatos e aluminatos de cálcio, capazes de se hidratarem conferindo hidraulicidade à cal.

Durante a cozedura do calcário, este passa por diferentes fases, observando-se o seguinte:

entre 500 °C e 700 °C ocorre a desidratação da argila. A cerca de 850 °C dá-se, a calcinação do calcário libertando anidrido carbónico. Entre 1000 °C e 1500 °C a reacção da sílica e da alumina da argila, com o óxido de cálcio, origina silicatos e aluminatos de cálcio.

Verifica-se que, quanto maior for a temperatura, menor é a quantidade de óxido de cálcio livre e maior é a quantidade de silicatos e aluminatos de cálcio, podendo-se obter um produto semelhante ao obtido no fabrico do cimento.

Após a saída do forno, obtém-se uma mistura de silicatos, aluminatos e de cálcio livre (entre 3% a 10%) e um pó inerte constituído por silicato bicálcico, formado por pulverização, durante o arrefecimento. Este produto, quando misturado com água, não aquece nem ganha presa (Coutinho, 2006).

Obtém-se também a cal viva que é necessário extinguir pelos inconvenientes da expansão, já referidos. A extinção é feita por aspersão, usando-se apenas a quantidade de água estritamente necessária para esta operação, uma vez que os silicatos e aluminatos também reagem com a água e o seu excesso pode provocar reacção, conferindo a presa. Esta é uma reacção bastante lenta e, no fim da extinção, é necessário ter a certeza de que apenas se ficou com aluminatos e silicatos de cálcio e cal apagada. Por estes motivos, esta operação deve ser feita em fábrica. Esta operação é que permite distinguir a cal hidráulica do cimento portland, uma vez que a finura da cal hidráulica é obtida por extinção da cal viva e não por moagem como no caso do cimento portland.

Terminada a operação de extinção, a cal hidráulica fica reduzida a pó, contudo, por vezes, aparecem pequenos nódulos escuros ricos em silicatos tricálcicos, designados por *grappier*, que são elementos sobreaquecidos que não se reduziram a pó. Daí que, após a extinção, deve-se peneirar a cal hidráulica, através de dois peneiros circulares rotativos, constituídos por dois tambores perfurados, coaxiais, sendo os furos do peneiro interior mais largos, para permitir a passagem do *grappier*. Pelo tambor exterior passa a flor de cal, muito fina (cal hidráulica por excelência). Na parte anelar fica o *grappier*, que depois de moído, é incorporado na cal hidráulica, aumentando a sua hidraulicidade. Quando é vendido à parte designa-se por cimento *grappier*, uma vez que depois de moído tem propriedades muito semelhantes às do cimento. Por vezes pode ser conveniente juntar materiais pozolânicos moídos (Aguiar, 2007).

Vantagens e Limitações

A cal hidráulica proporciona às argamassas uma boa trabalhabilidade, um aumento da resistência mecânica, boa aderência às superfícies, um bom acabamento, maior rentabilidade de mão-de-obra, melhorando consideravelmente a qualidade da construção civil.

A cal hidráulica, tem vantagens sobre as argamassas à base de cimento devido à sua menor retracção. Usa-se também misturada com cimento Portland para o fabrico de argamassas para assentamento de alvenarias. Devido às características referidas, as argamassas com cal hidráulica assumem um papel relevante na reabilitação de edifícios antigos.

Como a cal hidráulica é muito semelhante ao cimento (na cor), pode prestar-se a falsificações, o que muitas vezes tem consequências desastrosas, porque a cal hidráulica tem menor resistência que o cimento. Além disso não há garantia da qualidade da cal, variando as percentagens dos seus constituintes, com conseqüente variação das suas propriedades (Orus, 1977).

Normalização

A cal para a construção encontra-se normalizada em Portugal desde 2002 pela NP EN 459-1. Esta norma subdivide-se em três partes a saber:

- Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade
- Parte 2: Métodos de ensaio
- Parte 3: Avaliação da conformidade

O processo de fabrico da cal deve ser alvo de um rigoroso Plano de Controlo de Qualidade, ao longo das diferentes fases, desde a matéria-prima até aos diversos produtos acabados. Para controlo da qualidade da cal é necessário garantir:

- A boa cozedura, não apresentando grãos de areia de material inerte;
- Que a cal não tenha sofrido carbonatação;
- Plasticidade;
- Estabilidade de volume;
- Resistências mecânicas só a muito longo prazo;

- Rendimento muito bom (com 100 litros de cal viva podem obter-se cerca de 300 litros de cal em pasta).

Para isso, a cal deve ser fabricada de acordo com as normas técnicas aplicáveis e na embalagem do produto deve constar a marca, o tipo, o número da Norma Técnica, o nome ou razão social do fabricante e ainda o Selo de Qualidade.

As cais de construção que estiverem conformes com os critérios da NP EN 459-1 deverão apresentar as seguintes indicações na embalagem ou na guia de remessa:

- tipo de cal de construção;
- forma comercial do tipo de cal;
- local de fabrico;
- instruções de utilização;
- massa;
- instruções de segurança.

O sistema de comprovação da conformidade para os produtos de cal de construção é feito pelo sistema de comprovação 2, que inclui a certificação do controlo da produção em fábrica por um organismo aprovado.

A Marcação da conformidade CE para produtos de cal de construção é feita como se exemplifica na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Exemplo de etiqueta com Marcação CE

Símbolo CE
Empresa
Morada
Fábrica
Data
EN 459-1
CL 90-Q

A Marcação CE em Produtos de Construção foi introduzida pela Directiva 89/106/EEC, dos Produtos da Construção e representa um passaporte sem o qual os produtos não podem ser comercializados na União Europeia.

Fornecimento, Recepção e Armazenamento

A cal aérea pode ser fornecida a em big bags, com capacidade de 500 a 2000 kg/unidade; ou em sacos de 5, 25, 40 ou 50 kg, em paletes. A cal pode ainda apresentar-se já em misturas aquosas (cal aérea extinta) ou pode ser distribuída a granel em camiões cisterna ou basculantes, equipados com meios para descarga pneumática para silos.

A cal viva pode ser distribuída comercialmente em forma de pedras, como saem do forno, ou moídas e ensacadas. A cal hidráulica natural é fornecida em pó misturada com um valor inferior a 3% de sulfato de cálcio que actua como regulador de presa (Coutinho, 2006). Pode ser distribuída a granel em camiões cisterna ou em sacos de 40 kg, em paletes de 30 ou 40 sacos.

Os intermediários devem realizar ensaios de autocontrolo de confirmação das propriedades da cal. Os resultados do ensaio de autocontrolo efectuado no centro de distribuição e na fábrica fornecedora da cal de construção devem ser comparados, avaliados e registados.

O intermediário só pode utilizar a marca de conformidade aplicada pelo fabricante se os resultados do ensaio de autocontrolo efectuado no centro de distribuição satisfizerem a norma e permanecerem no intervalo dos valores máximo e mínimo dos correspondentes resultados de autocontrolo da fábrica durante os 12 meses precedentes.

A frequência da amostragem e de ensaio deve ser pelo menos conforme o especificado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Frequência de amostragem e ensaio para centros de distribuição

Propriedade	Tipo	Método de ensaio	Frequência mínima
Tempo de presa	Cais hidráulicas naturais		
Resistência aos 28 dias	Cais hidráulicas		
CO₂	Cais vivas Cais hidratadas Pastas de cal	EN 459-2:2001	Semanal
Água livre	Cais hidratadas Pastas de cal Cais hidráulicas naturais Cais hidráulicas		
Reactividade	Cais vivas		

O armazenamento deve ser feito em zonas sem humidade. A cal hidratada é um material susceptível a sofrer alteração na sua composição, devido à interacção com a humidade do ambiente e com o CO₂ presente no ar. Portanto, mesmo devidamente embalada, deve-se considerar a possibilidade da ocorrência de carbonatação do produto embalado. Recomenda-se por isso que o armazenamento não seja muito prolongado. A cal viva nunca poderá ser armazenada em conjunto com matérias inflamáveis e deve ser extinta imediatamente após a sua chegada à obra, salvo se forem adoptadas disposições que evitem a sua hidratação ou carbonatação.

3

Requisitos da Cal

Requisitos Físicos e Mecânicos

Requisitos Químicos

Requisitos Físicos e Mecânicos

Os requisitos físicos das diferentes cais de construção devem de acordo com a Norma NP EN 459-1:2002, respeitar os valores indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Requisitos físicos das cais de construção

Tipo de cal de construção	Finura		Expansibilidade			Teor em água livre - de acordo com 5.11 da EN 459-2:2001	Ensaio de argamassa	
	de acordo com 5.2 da EN 459-2:2001		Outras cais de construção à exceção de pasta de cal e cais dolomíticas hidratadas		Pastas de cal e cais dolomíticas hidratadas de acordo com 5.3.3. da EN 459-2:2001		Penetração	Teor de ar
	% de resíduo em massa		Método de referência de acordo com 5.3.2 1. da EN 459-2:2001	Método alternativo de acordo com 5.3.2.2 da EN 459-2:2001			de acordo com 5.5 da EN 459-2:2001	de acordo com 5.7 da EN 459-2:2001
	0,09 mm	0,2 mm	mm	mm			%	mm
CL 90			< 2	< 20	Satisfaz o ensaio	>10 e < 50	< 12	
CL 80								
CL 70	< 7	< 2						
DL 85			-	-				
DL 80								
HL 2					< 2	>10 e < 50	< 20	
HL 3,5								
HL 5								
NHL 2	< 15	< 5	< 2	< 20	-			
NHL 3,5								
NHL 5								

A resistência à compressão é determinada segundo a norma NP EN 196-1:1996. Esta norma refere que, para a composição da argamassa, a relação água/ligante de 0.50 só é aplicável às cais HL 5 e NHL 5. Para as cais HL 2, HL 3.5, NHL 2 e NHL 3.5, a relação água/ligante deve ser de 0.55 (cada amassadura para três provetes de ensaio, deve preparar-se usando (248 ± 1) g de água).

Já as cais hidráulicas e as cais hidráulicas naturais, com massa volúmica aparente igual ou inferior a 0.60 kg/dm^3 , que vão ser submetidas a ensaio de resistência à compressão, devem ser amassadas com uma relação água/ligante de 0.60 (cada amassadura para três provetes de ensaio, deve preparar-se usando (270 ± 1) g de água).

Na Tabela 3.2 apresenta-se a resistência à compressão das várias cais hidráulicas segundo a norma NP EN 459-1:2002.

Tabela 3.2: Resistência à compressão da cal hidráulica e da cal hidráulica natural (NP EN 459-1:2002)

Tipo de cal de construção	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
HL 2 e NHL 2	-	> 2 a < 7
HL 3,5 e NHL 3,5	-	> 3,5 a < 10
HL 5 e NHL 5	> 2	> 5 a < 15 ¹

1 - HL 5 e NHL 5, com uma massa volúmica aparente inferior a $0,90 \text{ kg/dm}^3$, podem ter uma resistência até 20 MPa

A finura pode ser definida, pelo método de referência, segundo a norma EN 196-6:1959, mas com alterações introduzidas pela NP EN 459-2:2002, ou pelo método alternativo, descrito na norma EN 12485, mas também com alterações propostas pela NP EN 459-2:2002. Também a norma americana da *ASTM Standards C110 - 06*, refere, na secção 16 um método para determinação da densidade aparente da cal hidratada e da cal viva.

A expansibilidade das cais de construção, devido às suas variações de características físicas e químicas, deve ser determinada através de mais do que um método de ensaio. Assim, para a cal hidratada de alto teor de cálcio, deve-se seguir o método descrito em 5.3.2.1 ou em 5.3.2.2 da NP EN 459-2:2002. A cal viva, a pasta de cal, a cal dolomítica e a cal dolomítica hidratada, devem seguir o método descrito em 5.3.3 da referida norma. Finalmente, a cal cálcica hidratada, a pasta de cal cálcica e a cal dolomítica hidratada contendo partículas maiores que 0.2 mm, devem seguir o método descrito em 5.3.4 da mesma norma. A expansibilidade é determinada observando-se a expansão volúmica de uma pasta de consistência normal, indicada pelo movimento relativo de duas agulhas.

O tempo de presa das cais de construção, é determinado de acordo com a norma NP EN 196-3:1996 que rege o ensaio para os cimentos. O tempo de presa, é determinado observando-se a penetração de uma agulha numa pasta de consistência normal até ao momento em que atinge um determinado valor.

A densidade aparente das cais cálcicas e dolomíticas varia de 0.3 a 0.6 e de 0.4 a 0.6, respectivamente, o que corresponde à massa volúmica aparente de 300 a 600 kg/m³. Para a cal viva, que é um produto de cor branca e se apresenta sob a forma de grãos de grande tamanho e estrutura porosa, a densidade média é de aproximadamente 0.85. Esta cal também se pode apresentar em pó, sendo que, neste caso, a massa volúmica aparente é de 0.50. e a densidade absoluta é, em média, 2.20. A sua massa volúmica real, varia entre 3.08 e 3.3 g/cm³, é muito ávida de água devendo ser mantida em tambores fechados para evitar a sua carbonatação.

A massa volúmica aparente deve ser determinada de acordo com a norma NP EN 459-2:2002. Para além desta, existe também a norma americana da *ASTM Standards C110 - 06* que refere, nas secções 19 e 20, os métodos para

determinação da densidade aparente da cal hidratada, da cal viva e da pedra calcária. A massa volúmica é referida na secção 21 da mesma norma.

O rendimento de uma cal, para uma determinada consistência, é igual ao volume de pasta obtido com uma unidade de massa de cal virgem. A consistência da pasta utilizada para a determinação do rendimento é uma consistência arbitrária, normalmente determinada pelo abatimento de um cilindro de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, que se deforma para 8.7 cm pela remoção do molde.

O ensaio para a determinação do rendimento deve ser realizado tendo em conta a norma NP EN 459-2:2002, sendo determinado quando a pasta de cal se desprende das paredes do recipiente de ensaio. Medindo-se a altura da pasta de cal, faz-se a média de quatro medições e obtém-se o rendimento sabendo-se que, a cada 2 mm de altura da pasta de cal, corresponde um rendimento de 1 dm³ por 10 kg de cal viva. A cal de variedade cálcica oferece melhores rendimentos que a cal magnésiana.

Quanto à reactividade à extinção, as cais vivas moídas devem ser ensaiadas segundo a norma NP EN 459-2:2002, medindo-se o aumento de temperatura que provoca a reacção com a água (curva de extinção por via húmida), em função do tempo de reacção. O tempo de reacção para a extinção de 80% da quantidade de CaO deverá ser inferior a 15 minutos, para todas as cais moídas. A reactividade só tem implicações quando a cal é usada na estabilização de solos. As cais cálcicas moídas devem alcançar uma temperatura máxima não inferior a 60 °C. Todas as outras cais moídas devem alcançar uma temperatura máxima não inferior a 50 °C.

A água livre determina-se recorrendo à norma NP EN 459-2:2002. Quando uma amostra é aquecida a 105 °C, a água livre evapora-se. A perda de massa a esta temperatura corresponde à humidade contida, expressa em percentagem da massa.

A percentagem de água retida deve variar entre os 65% e os 85%. A norma americana ASTM C110 - 06, explica o procedimento a realizar.

A plasticidade é a propriedade que confere fluidez à argamassa, facilitando seu espalhamento. É também o termo utilizado para definir a maior ou menor facilidade de aplicação das argamassas como revestimento. Diz-se que a cal é plástica quando se espalha facilmente, resultando numa superfície lisa sob o rasto da colher do pedreiro. Se ela é arrastada por se agarrar à colher, pode provocar trincas ou mesmo soltar-se da parede. Nesse caso é considerada não-plástica. A cal magnésiana produz argamassas mais trabalháveis do que a cal cálcica. A norma ASTM C110 - 06 dá indicações para a sua determinação na secção 6.

A incorporação de areia, é a propriedade que expressa a facilidade da pasta de cal hidratada envolver e recobrir os grãos do agregado e, conseqüentemente, agregar os mesmos. Cais com alta plasticidade e alta retenção de água têm maior capacidade de incorporar areia. Comparativamente, o poder de incorporação de areia da cal hidratada é de 1:3 a 4, enquanto no cimento é de 1:2 a 2.5. Esta propriedade justifica o emprego das cais na produção de argamassas.

A capacidade de absorver deformações, é conferida à argamassa pela cal hidratada e, torna-se de grande importância quando aplicada em paredes ou lajes muito solicitadas.

A carbonatação do hidróxido realiza-se com perdas de volume e por isso o produto está sujeito a retracções, cuja consequência é o aparecimento de fissuras nos revestimentos. Sendo a cal normalmente empregue em mistura com agregados miúdos na elaboração de argamassas, a introdução desse produto em proporções convenientes reduz os efeitos da retracção.

A proporção de pasta de cal na argamassa deve obedecer a um limite mínimo, abaixo do qual deixa de ser trabalhável. Essa proporção determina a capacidade de sustentação de areia da pasta de cal. A experiência mostra que a cal cálcica tem maior capacidade de sustentação de areia do que a cal magnesiânica.

Requisitos Químicos

Os requisitos químicos para as cals de construção são definidos pela Norma NP EN 459-2:2001.

Tabela 3.3: Características químicas das cals aéreas (NP EN 459-1:2002) (valores expressos em % de massa)

Tipo de cal de construção	CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Cal Livre
CL 90	> 90	< 5 ^a	< 4	< 2	--
CL 80	> 80	< 5 ^a	< 7	< 2	--
CL 70	> 70	< 5	< 12	< 2	--
DL 85	> 85	> 30	< 7	< 2	--
DL 80	> 80	> 5	< 7	< 2	--
HL 2	--	--	--	< 3 ^b	> 8
HL 3,5	--	--	--	< 3 ^b	> 6
HL 5	--	--	--	< 3 ^b	> 3
NHL 2	--	--	--	< 3 ^b	> 15
NHL 3,5	--	--	--	< 3 ^b	> 9
NHL 5	--	--	--	< 3 ^b	> 3

a - é admitido um teor de MgO até 7%, desde que seja satisfeito o ensaio de expansibilidade indicado em 5.3 da EN 459 2:2001

b - é admitido um teor de SO₃ superior a 3% e até 7%, desde que seja satisfeito o ensaio de expansibilidade, após 28 dias de conservação na água, segundo um ensaio indicado na EN 196-2.

A determinação do teor em óxido de cálcio e de magnésio, a determinação do teor em óxido de magnésio e a determinação do teor em sulfato, bem como o ensaio para determinação da perda ao fogo, normalizados pela NP EN 196-2:1996.

A determinação do teor em dióxido de carbono pode ser realizada através do método de referência, referido na NP EN 196-21:1990, ou através do método alternativo, normalizado pela NP EN 459-2:2002. Para além destes, existe ainda o ensaio para determinação do teor em cal livre, este por sua vez, normalizado pela NP EN 459-2:2002.

Para os diferentes tipos de cais aéreas, referidas neste capítulo, a Norma NP EN 459-1:2002 define os seguintes requisitos:

todos os tipos de cal podem conter aditivos em pequenas quantidades. A quantidade e os tipos de aditivos devem ser descritos se o seu teor exceder 0.1%. Os aditivos não deverão ter qualquer influência negativa sobre as propriedades das argamassas. Para a cal destinada a estruturas, impõem-se os seguintes limites:

Tabela 3.4: Componentes químicos das cais

Componentes		Cal	Cal magnesiana
CaO (min)		75	-
MgO (min)		-	20
CaO + MgO (min)		95	95
SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ (max)		5	3
CO ₂ (max)	amostragem	local de fabrico	3
		outro local	10

4

Aplicações da Cal

Argamassas e Betões

Pinturas

Estabilização de Solos

Blocos de Terra para Alvenaria

Revestimentos Betuminosos

Argamassas e Betões

A utilização mais frequente da cal, passa pela confecção de argamassas para assentamento de alvenarias, execução de betonilhas para regularização de pavimentos e ou para revestimentos de alvenarias interiores e exteriores. Seja como único ligante, em mistura com outros ligantes aéreos (gesso), hidráulicos (cimento portland) ou com aditivos pozolânicos as argamassas com cal constituem um material de elevada versatilidade. Plásticas e trabalháveis enquanto frescas e possuidoras de uma certa rigidez após o endurecimento.

No fabrico de blocos, abobadilhas e outros artefactos pré-fabricados à base de cimento como os lancis e pavês, a utilização de cal contribui para a redução do consumo do cimento.

A cal é também utilizada no fabrico de blocos silico-calcários, os quais se encontram regulados pela Norma EN 771-2: 2003 (*Calcium Silicate Masonry Units*). Este material foi inventado em 1880 pelo químico alemão Wilhelm Michaelis. Estes blocos destinam-se à execução de alvenarias e são constituídos por areia siliciosa, cal e água curados com vapor a alta pressão em autoclave.

Muito embora a sílica seja um material inerte, em determinadas condições de pressão e temperatura, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio da cal para formar fases estáveis do tipo CSH.

Devido ao elevado nível de resistência mecânica (15-40MPa) este blocos tem claramente vocação estrutural. A cal utilizada no fabrico dos blocos silico-calcários será uma cal com uma elevada percentagem de CaO que já se encontre no estado hidratado (Santos, 1985).

Também o fabrico de blocos e outros artefactos de betão celular autoclavado requer a utilização de cal (Figura 4.1).



Figura 4.1: Cura de betão celular em autoclave (Guerreiro, 2002)

Este material foi descoberto em 1914 pelo sueco Johann Axel Erikson e é obtido através de uma reacção química entre a cal, o cimento portland, areia siliciosa e pó de alumínio. A cura da mistura em autoclave, conduz à formação de compostos estáveis de silicatos de cálcio, sendo que o pó de alumínio é responsável pela estrutura porosa do betão celular (Mateus, 2004).

O betão celular autoclavado é comercializado nos mais diversos tipos de artefactos, desde blocos para alvenaria, passando por caixas de estore até painéis de laje (Figura 4.2)



Figura 4.2: Construção com betão celular autoclavado: Em cima assentamento de blocos; em baixo colocação de painel de laje (Mateus, 2004)

Segundo Boyton (1966), no início do século, utilizava-se cal hidratada como aditivo no fabrico de betões, pelo facto de reduzir a permeabilidade dos betões. Shui *et al.* (1986) estudaram a influência da adição de cal hidratada e pozolanas a betões tendo constatado um aumento da durabilidade daqueles materiais.

Mais recentemente Mira *et al.* (2002) concluíram que a adição de leitada de cal (lime putty) até 25% e pozolanas contribui de forma significativa para a criação de uma estrutura do betão bastante mais densa, menos susceptível ao ataque por cloretos e à carbonatação. Estes autores alertam porém para o facto de essa adição reduzir o tempo de presa pelo facto de haver uma formação mais rápida de fases de CSH (Calcium Silicate Hydrates).

Pinturas

As pinturas de revestimentos de edifícios com recurso à cal compreendem basicamente as variantes de caição ou barramento (Veiga e Tavares, 2002):

- Caição - aplicação de leitada de cal pura ou aditivada com pigmentos orgânicos. É recomendada a utilização de cal aérea em pasta, bem apagada, em vez de cal aérea em pó, para garantir melhor aderência ao suporte e maior durabilidade. A caição é feita com camadas de pequena espessura, com a parede húmida para não fissurar, sobre uma camada de reboco áspera. A relação cal/pigmento/água tem que ser feita com precisão. De facto, uma grande quantidade de água faz migrar com mais facilidade a cal para a superfície, o mesmo acontecendo com o pigmento, ao passo que uma quantidade de água insuficiente dificulta a aplicação da cal e a sua homogeneidade. A tinta de cal pode ser aditivada com uma resina acrílica, após testes e escolha da resina adequada e da quantidade apropriada, para dar maior durabilidade e resistência a esta tinta. No entanto, o uso de uma quantidade excessiva de resina pode endurecer e tornar quebradiça a camada de pintura e reduzir significativamente a sua permeabilidade ao vapor de água (Figura 4.3).



Figura 4.3: Processo de caiação Tradicional

- Barramento – técnica de acabamento que teve o seu apogeu durante o período Barroco, durante o qual foi utilizada em inúmeros palácios e monumentos. O barramento é composto por cal, pó de pedra ou areia de granulometria, pigmento inorgânico e água. O pigmento é diluído em água e misturado à massa de cal, adicionando-se em seguida a areia ou pó de pedra a esta mistura. A aplicação é feita com a parede húmida, para não fissurar, sobre uma camada de reboco áspero. No entanto esta técnica é difícil de dominar actualmente, exigindo pessoal especializado, principalmente no caso dos barramentos coloridos. Constitui além disso uma solução cara que só faz sentido utilizar em edifícios com valor histórico ou arquitectónico considerável.

Lopes (2001) estudou a temática da caiação, registando o bom comportamento à acção do tempo desta técnica particular quando comparada com as tradicionais tintas para exteriores. Este autor refere também que a temperatura de calcinação da cal interfere nas propriedades da leitada de cal.

A utilização da caiação apresenta-se como uma solução de acabamento que é arquitectonicamente muito superior à opção por tintas correntes de produção industrial.

Estabilização de Solos

O uso de cal no tratamento de solos para construção de estradas, é uma das técnicas mais antigas de consolidação. Este processo já era utilizado há 2000 anos, contudo foram os Romanos que desenvolveram a sua aplicação em geotecnia, nomeadamente na secagem de terrenos e na fixação das lajes de pedra de algumas das suas estradas às plataformas. Implementaram ainda o uso de pozolanas para melhorar a acção da cimentação da cal.

As primeiras experiências da utilização de cal na construção rodoviária, surgiram nos Estados Unidos da América, nos estados do Texas e Missouri, em 1924, e na Rússia, em 1926. Alguns países tropicais, como por exemplo a Rodésia do Norte (Zimbabwe), também implementaram esta técnica de estabilização na construção de estradas, a partir de 1950 (Cartmell, 1958).

Em Moçambique, por exemplo, a estabilização com cal era utilizada sobretudo nos casos específicos em que a utilização de solos com elementos grossos resistentes dependia apenas da correcção do seu índice de plasticidade, e naqueles em que só se dispunha de solos finos com elevado índice de plasticidade, os quais não permitiam uma boa homogeneização quando tratados com cimento ou betume (Luís, 1972).

Mecanismo de estabilização dos solos pela cal

O conceito de melhoramento ou estabilização dos solos através de reacções químicas entre as partículas de solo, a água dos vazios e os materiais adicionados é semelhante tanto para o cimento como para a cal, porém os efeitos da estabilização com cal são mais rápidos do que os da estabilização com cimento (Cristelo, 2001).

Ao misturar cal num solo húmido ocorrem várias reacções químicas que provocam a aglutinação das suas partículas e modificação das suas

características. As reacções mais importantes durante o processo de estabilização com cal são agrupadas da seguinte forma:

- Permuta iónica e floculação.
- Acção de cimentação (ou reacção pozolânica).
- Acção de carbonatação.

A permuta iónica faz com que os catiões Ca^{2+} se adsorvam à superfície das partículas diminuindo a sua electronegatividade e promovendo a floculação. A acção dos iões cálcio, inicia-se logo após a adição de cal ao solo plástico, deixando a mistura húmida solta a curar (processo este também chamado de apodrecimento, devido ao cheiro que se desenvolve), há uma diminuição da plasticidade, o solo torna-se friável e facilmente se desagrega.

A argila, agora formada por partículas de maiores dimensões, perde plasticidade, coesão e expansibilidade, e aumenta a sua trabalhabilidade. Para atingir estes benefícios, basta utilizar uma pequena quantidade de cal. Por vezes, apenas 1 a 2 % provocam significativas melhorias.

A acção de cimentação exige bastante tempo, sendo por isso uma reacção lenta, o que a torna responsável pela acção a longo prazo da cal na estabilização. É designada por reacção pozolânica e acontece sob condições climáticas quentes, podendo ser acelerada com recurso a aditivos adequados. Promove a formação de silicato hidratado de cálcio e/ou aluminato de cálcio pela reacção entre a cal, a sílica e a alumina livres nas partículas de argila.

A interacção entre a cal e a argila dissolve a sílica e a alumina das partículas de solo em ambiente de pH elevado, criado pelas moléculas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Os materiais dissolvidos combinam-se com os iões cálcio, compondo produtos cimentícios que interligam as partículas argilosas (Figura 4.4).

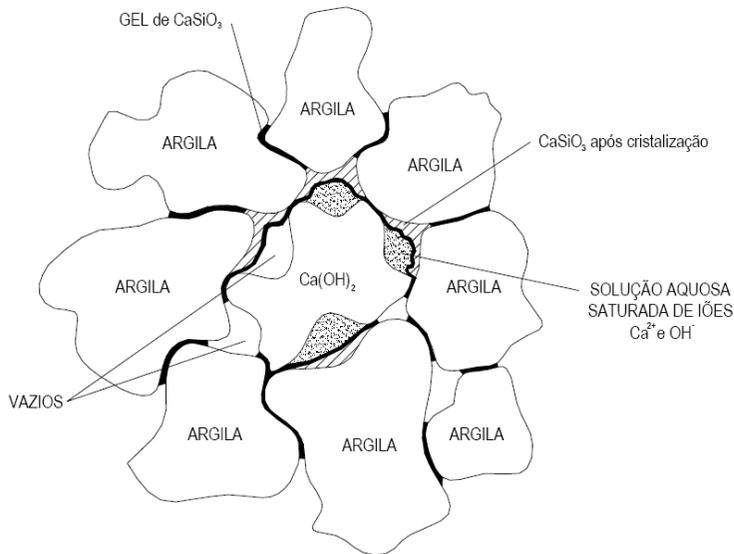


Figura 4.4: Formação de material cimentício numa mistura solo-cal (Cristelo e Jalali, 2008)

Finalmente a reacção de carbonatação é a reacção da cal com o dióxido de carbono da atmosfera. Consiste na alteração química dos minerais argilosos devido à reacção do ião carbonato ou bicarbonato com qualquer substância mineral, principalmente com iões cálcio dos minerais, formando carbonato de cálcio. Esta é a reacção inversa da produção de cal a partir do calcário, e deve ser evitada uma vez que os carbonatos de cálcio e magnésio formados prejudicam a reacção pozolânica, impedindo o alcance da resistência desejada (Castro & Serafim, 1974).

Principais propriedades da cal para estabilização

A identificação das propriedades físico-químicas da cal é essencial para a sua aplicação na estabilização de solos. Uma das principais propriedades a ter em conta é a granulometria, uma vez que influencia várias propriedades da mistura solo-cal, como por exemplo a velocidade de hidratação, o peso volúmico e também a homogeneidade. A granulometria da cal é condicionada pela granulometria da rocha calcária, pelo processo de calcinação, pelo produto obtido (cal viva ou cal apagada) e por possíveis moagens suplementares devido às diferentes utilizações que podem ser atribuídas à cal.

O conhecimento da superfície específica da cal, pode ser útil para a avaliação do grau de homogeneização e de reacção da cal com o solo e com a água, pois maiores superfícies de contacto dão origem a misturas mais equilibradas. A estrutura porosa das partículas de cal faz com que a superfície exterior esteja em contacto com a água mas, através dos fenómenos de absorção e adsorção, também uma parte interior da sua superfície é envolvida pela água.

A reactividade revela a rapidez da acção da cal depois da aplicação e a eficiência da sua acção estabilizante. Esta propriedade permite antecipar a duração das reacções e, se estas forem exotérmicas, o aumento da temperatura produzia.

Aplicação de Misturas Solo-Cal

Para a realização de uma mistura solo-cal para modificação ou estabilização de solos, é necessário encontrar o teor em cal mais adequado para a situação em estudo e depois determinar as propriedades da mistura e a sua alteração ao longo do tempo.

O teor óptimo em cal depende da futura aplicação do material estabilizado, pois há uma grande variedade de teores, que podem ser adoptados em função das propriedades requeridas. Estas podem ter como objectivo a diminuição da plasticidade e o aumento da trabalhabilidade – melhoramentos – ou a realização de alterações definitivas com efeitos na resistência da mistura – estabilizações.

Para a dosagem das misturas solo-cal determinam-se, os limites de consistência, a granulometria e a classificação e realizam-se ensaios de compactação, resistência e durabilidade, para cada solo. Para a escolha final da mistura realizam-se ensaios de resistência e durabilidade, todavia os critérios mínimos adoptados são variáveis. Em climas frios, por exemplo, a durabilidade é a maior exigência (Castro e Serafim, 1974).

O teor em cal a usar na estabilização dos solos, deve ser sempre da ordem de 1 a 10% contudo, deve ser determinado em cada caso. A utilização de quantidades superiores não é económica nem necessária, mas nunca se deve utilizar menos de 3%, pois mesmo que em laboratório se tenha obtido as modificações pretendidas com um teor inferior, as condições de mistura na obra são sempre mais imperfeitas.

As dosagens para as misturas solo-cal baseiam-se em várias características, sendo que as principais são: o limite de consistência, a granulometria, a classificação, a compactação, a resistência e a durabilidade. Por vezes, também se podem ter em conta outras características como o pH, a composição mineralógica, a expansibilidade, o teor em matéria orgânica e sulfatos e a capacidade de permuta iónica.

A modificação de solos tem como objectivo a redução da plasticidade, a melhoria da trabalhabilidade e da resistência à desfloculação e à erosão, o aumento da resistência ao corte e a redução do potencial de variação de volume.

A estabilização com cal é sobretudo indicada para os solos com fracção fina muito plástica e expansiva, sendo o seu principal campo de aplicação nas obras rodoviárias, particularmente para melhoria de sub-camadas argilosas do solo de fundação de pavimentos e na realização de aterros com solos argilosos húmidos.

Na estabilização de um solo para integrar bases e sub-bases de pavimentos rodoviários, a mistura solo-cal deve apresentar resistência adequada e mantê-la em condições de humidade, uma vez que se pretende alcançar um aumento da resistência e uma compactação no teor óptimo em água depois do espalhamento e da mistura da cal (Figura 4.5).



Figura 4.5: Estabilização de solo com cal

O material inicia o processo de cimentação, fortifica e torna-se mais granular, podendo assim considerar-se um material agregado com partículas de maiores granulometria e ângulo de atrito. A estabilidade assim alcançada melhora a resposta dos solos em relação aos movimentos de assentamento ou deslizamento, possibilitando a sua utilização em aplicações estruturais.

Para que uma mistura solo-cal tenha um bom comportamento em obra, deve ter características satisfatórias, sendo estas permanentes e resistentes às acções de meteorização, e deve também ser convenientemente aplicado.

Quando os teores em cal usados são elevados, a durabilidade das misturas é maior, sendo por isso recomendado por alguns técnicos que se utilize no mínimo 5% de cal, mesmo quando uma quantidade menor alcance a resistência necessária (Cristelo, 1974).

Blocos de Terra para Alvenaria

A terra foi presumivelmente o mais antigo material de construção utilizado pelo homem. Os vestígios de habitações humanas do período Mesolítico (em 12000 A.C.) confirmam a utilização de terra em estruturas de paredes.

A pirâmide de Uxmal, no México, construída entre os séculos VI e X é outro exemplo de uma mega-estrutura construída com terra. O seu centro é de terra compactada e o exterior é recoberto por pedras. A Pirâmide do Sol, também no México, em Teotihuacán, tem em seu núcleo dois milhões de toneladas de terra compactada.

Estruturas de alvenaria de blocos de solo-cal e argamassas à base de cal, são comuns nas construções da América Central. As ruínas da cidade de Chanchán no Peru constituem um dos mais antigos conjuntos arquitectónicos feitos com terra (Alexandra, 2006).

Entre as construções mais antigas com uso de terra, está também o Povoado de Taos, no estado do Novo México, que foi erguido entre 1000 e 1500, com paredes de argila seca ao sol e reforçada com fibras vegetais (Figura 4.6).

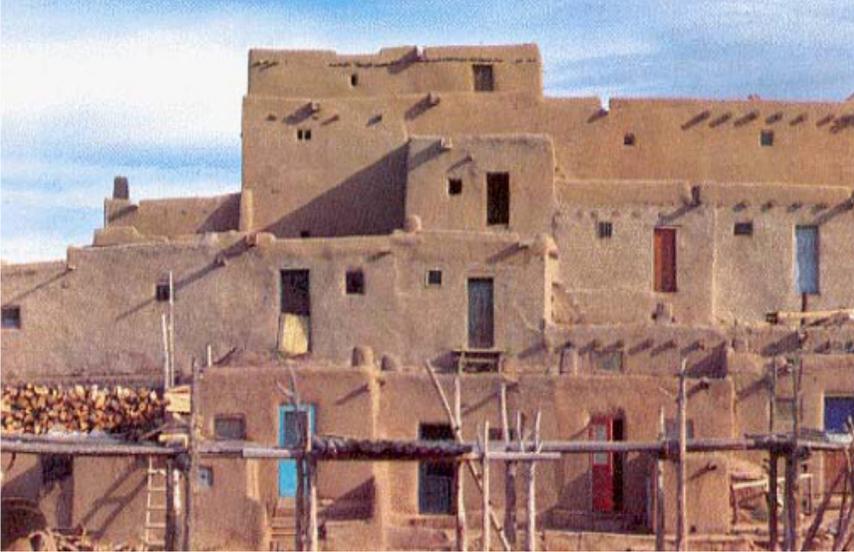


Figura 4.6:
*Edificações em terra
(Taos, Novo
México)*

Os processos de produção de blocos em terra podem ser de dois tipos: a fabricação de blocos de terra comprimidos (BTC), utilizada para misturas de terra estabilizada com cimento, cal ou outras misturas e a fabricação de blocos de adobe, também designados por bloco de terra artesanal (BTA).

Em princípio, a terra de qualquer jazida pode ser usado para a confecção de paredes, blocos e tijolos. Os mais indicados são os solos que possuem 50% a 70% de teor em areia em sua composição. A quantidade de água adicionada à mistura varia conforme o tipo de solo a usar, quanto mais argiloso for o solo, maior a necessidade de água.

Se a mistura de terra for homogênea a construção apresenta fortes propriedades estruturais. A resistência à compressão é de aproximadamente 0.5 MPa para BTA e de 18 MPa para BTC. Os resultados médios de resistência à flexão correspondem a aproximadamente 30% dos resultados de compressão (Correia *et al.*, 2005).

Adobe

O termo adobe deriva do árabe “*attob*” e significa tijolo seco ao sol. Este facto leva a pensar que esta técnica terá sido introduzida na Península Ibérica durante a ocupação árabe. No Sul de Portugal são frequentes edifícios de

habitação com alvenaria em adobe (solo arenoso e cal), ainda em razoáveis condições de conservação que datam do início do século XX.

Pinho (2001) procedeu a um levantamento exaustivo das paredes de edifícios antigos em Portugal, referindo casos invulgares de paredes mistas de adobe e xisto.

A fraca resistência deste material à humidade do solo, obrigava a que a alvenaria de adobe fosse executada sobre uma fundação em alvenaria de pedra que subia acima do piso térreo (Figura 4.7)



Figura 4.7: Alvenaria de adobe sobre fundação de pedra no Alentejo

A execução de alvenarias com blocos de adobe é feita de forma idêntica à alvenaria tradicional com tijolos de barro cozido. Assentes sobre uma fundação de pedra ou de betão armado, os blocos de adobe são assentes em função da espessura da parede (à meia vez, a uma vez ou a duas vezes)

Após a execução dos blocos de adobe estes ficam a secar ao ar livre. A produção em locais cobertos permite a perda gradual de água, proporcionando uma melhor qualidade do adobe (Figura 4.8).



Figura 4.8: Blocos de adobe em fase de cura

O ressurgimento da construção em terra tem a ver com a baixa energia incorporada deste material, o que evidencia o seu contributo evidente para uma construção sustentável (Sukla *et al.*, 2008). Em Portugal a construção de edifícios com alvenaria de adobe na actualidade tem tido alguma expressão nas regiões do Alentejo e Algarve (Figura 4.9)



Figura 4.9: Edifício com paredes em blocos de adobe construído no Algarve (Mateus, 2004)

Millogo *et al.* (2008) estudaram a influência da adição de cal a solos argilosos para fabrico de blocos de adobe, concluindo que a utilização de 10% de cal maximiza a resistência à compressão e minimiza a absorção de água dos blocos de adobe. De acordo com aqueles autores, a adição de percentagens crescentes de cal induz a formação de compostos visíveis ao nível da microestrutura de calcite e fases de CSH (Figura 4.10 c zona E), formadas a partir da reacção entre a cal e o quartzo (sílica) do solo. Já quando a

percentagem de cal sobre para 12% há lugar à formação de portlandite (Figura 4.10 f zona H).

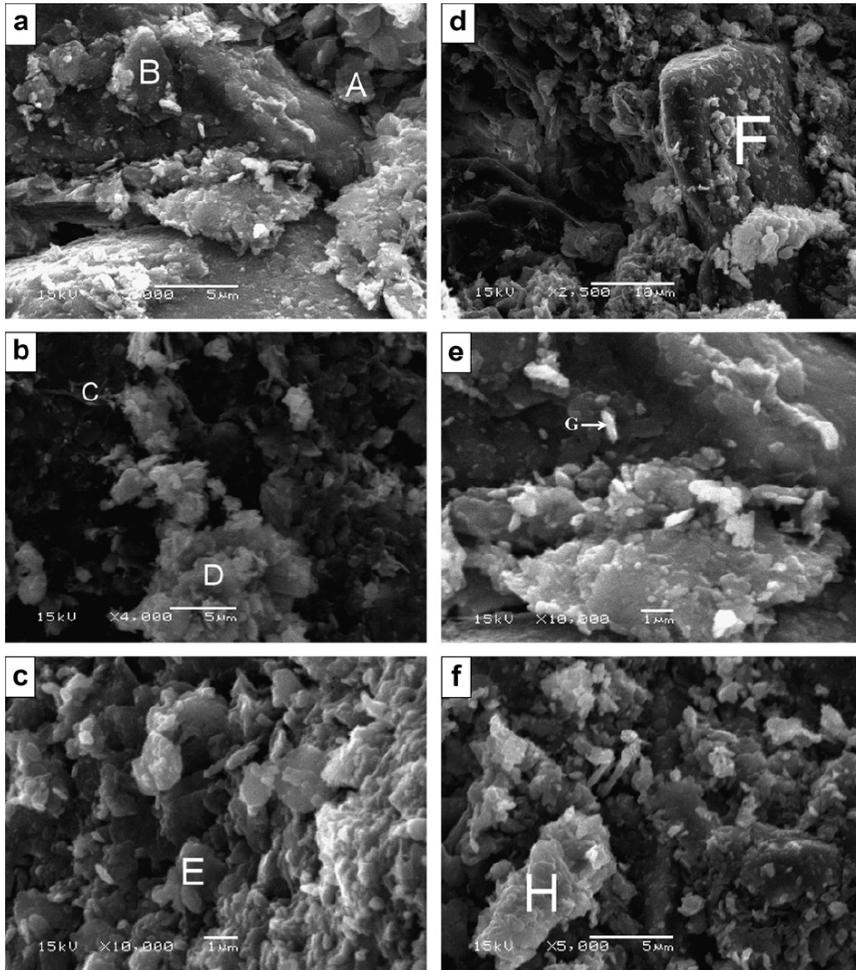


Figura 4.10: Microestrutura de blocos de adobe com cal: a) Sem cal; b) com 4% de cal; c) com 6% de cal; d) e e) 10% de cal; f) com 12% de cal (Millogo, 2008)

Blocos de Terra Comprimidos (BTC)

Os blocos de terra comprimidos (BTC) são uma variante moderna dos blocos de adobe, recorrendo à compactação para melhorar o seu desempenho mecânico. A execução de unidades habitacionais, com alvenarias de BTC é pouco frequente em Portugal, tendo no entanto vindo a aumentar muito pela carga de sustentabilidade que lhe está associada, com a vantagem de apresentarem desempenhos superiores às alvenarias de adobe (Figura 4.11).



Figura 4.11: Em cima construção de alvenarias com recurso a BTC-Alentejo; em baixo várias unidades de BTC



Uma das prensas mais conhecidas para o fabrico de BTC é designada por CINVA-Ram e foi inventada em 1956 pelo engenheiro Colombiano Raul Ramirez ao serviço de uma organização dedicada à habitação e que possuía o acrónimo CINVA. Na Figura 4.12 é visível a execução de um BTC com a referida prensa.



Figura 4.12: Execução de BTC com a prensa Cinva-ram: a) Enchimento da câmara com terra; b) confinamento da mistura; c) elevação do BTC; d) retirada do BTC

As prensas correntes, aplicam pressões da ordem dos 2MPa, embora existam prensas capaz de aplicar pressões superiores, estas tem no entanto o inconveniente de serem bastante pesadas e caras. A utilização de blocos que se encaixam uns nos outros, permite ainda minimizar ou nalguns casos mesmo dispensar a aplicação de argamassa (Figura 4.13).

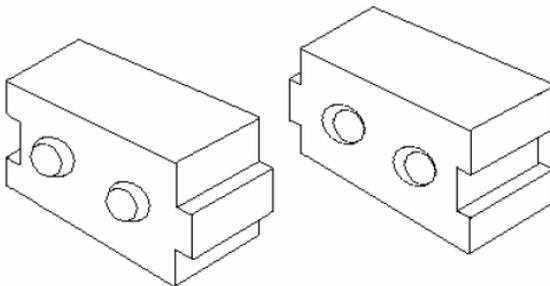


Figura 4.13: BTC com encaixes tipo macho/femêa

Além da existência de encaixes do tipo macho/fêmea, os BTC podem ser vazados, permitindo a colocação de tubagens para redes hidráulicas, de telefone e de energia. As instalações embutidas evitam a quebra das paredes e são colocadas durante a execução da alvenaria.

O estabilizante correntemente utilizado no fabrico de BTC, é o cimento embora a cal se assuma como um estabilizante mais barato e mais sustentável, porquanto não tem um impacto ambiental tão elevado, pelo que é expectável que a sua utilização venha no futuro a ganhar uma utilização superior.

Eires e Jalali (2007) avaliaram a possibilidade de execução de BTC com solo arenoso, estabilizado com misturas de metacaulino e cal hidratada, concluindo que as percentagens mais adequadas são 75% para o metacaulino e 25% para a cal. Estes autores concluíram ainda que a adição de determinados aditivos permite maximizar a durabilidade mecânica e a resistência a bactérias e fungos.

Revestimentos Betuminosos

A utilização de cal hidráulica como *filler* das misturas betuminosas provoca uma melhoria das características da camada de desgaste daqueles revestimentos. De facto, conseguem promover uma maior consistência do betuminoso, devido à maior aderência entre este material e os agregados. Esta adição melhora também a resistência à penetração da água retardando o envelhecimento acelerado e aumenta ainda a resistência à fissuração (Cross, 1999).

Niazi e Jalili (2008) analisaram a influência da utilização de diversas percentagens de cal hidratada em pó e de cal hidratada em pasta (0,5; 1; 1,5 e 2,) na reciclagem de misturas betuminosas a frio, concluindo que estes

aditivos conseguem aumentar a resistência mecânica e a resistência à água, sendo que o desempenho é proporcional à percentagem de cal e que a cal em pasta apresenta um desempenho ligeiramente melhor que a cal em pó. Estes autores referem que o uso de cal aumenta a resistência à deformação em quase 30%.



Figura 4.14: Execução de camada de revestimento betuminoso

Outros autores observaram que o uso conjunto de 2% de cal e polímeros do tipo estireno-butadieno influencia muito positivamente o desempenho de misturas betuminosas (Kok & Yilmaz, 2008).

Também os resultados de Airey *et al.* (2008) confirmam a influência positiva do uso de cal na resistência à água de misturas betuminosas.

5

Argamassas com Cal: Propriedades e Durabilidade

Endurecimento

Endurecimento

O endurecimento da cal aérea inicia-se com a secagem da água em excesso, a que se segue o endurecimento por carbonatação, quando o hidróxido de cálcio reage com o dióxido de carbono para formar carbonato de cálcio ou calcite. O processo de endurecimento da cal aérea desenvolve-se em cinco etapas (Johannesson e Utgenannt, 2001):

- a) Difusão do CO_2 através dos poros da argamassa;
- b) Dissolução do CO_2 na água dos poros;
- c) Dissolução do Ca(OH)_2 na água dos poros;
- d) Reacção entre o Ca(OH)_2 e o CO_2 ;
- e) Precipitação do CaCO_3

Sendo necessária a absorção de CO_2 do ar para o endurecimento da cal aérea, esta não endurece debaixo de água. Este mecanismo de endurecimento explica o nome geralmente atribuído a este aglomerante - “cal aérea” - contrariamente à outra variedade (a cal hidráulica) que endurece principalmente por acção da água. O endurecimento que depende do ar atmosférico é muito lento, pois as camadas espessas no interior mantêm-se frescas durante longo tempo. Assim, ao adicionar água à cal aérea, obtém-se uma pasta que vai endurecendo lentamente ao ar. A pasta de cal é muito pouco permeável, mantendo-se por isso 5 ou 6 semanas sem se recarbonatar. Daí que em certos monumentos muito antigos, as argamassas à base de cal aérea ainda se mantêm moles no seu interior, pois a camada de CaCO_3 que se forma à superfície não deixa penetrar o CO_2 , impedindo a recarbonatação no interior (Coutinho, 2006).

Sendo uma reacção exotérmica, com dilatação ligada à libertação de calor durante o endurecimento, pode causar fendilhação por retracção. Daí a incorporação de areia, para reduzir a possibilidade de retracção da pasta de cal apagada, dividindo-a em pequenas fracções e permitindo a entrada do ar

necessário para a carbonatação. A areia deve ser siliciosa ou calcária, limpa, isenta de humidade e de argila, pois além da carbonatação, o endurecimento da cal dá-se também pela combinação do hidróxido com a sílica (Bauer, 1987).

Na Figura 5.1, apresenta-se a microestrutura de duas argamassas à base de cal aérea, sendo que na primeira a superfície do agregado se apresenta coberta por alguns cristais de carbonato de cálcio, enquanto que a segunda se apresenta profusamente coberta desses cristais, facto indicativo de um extenso processo de carbonatação.

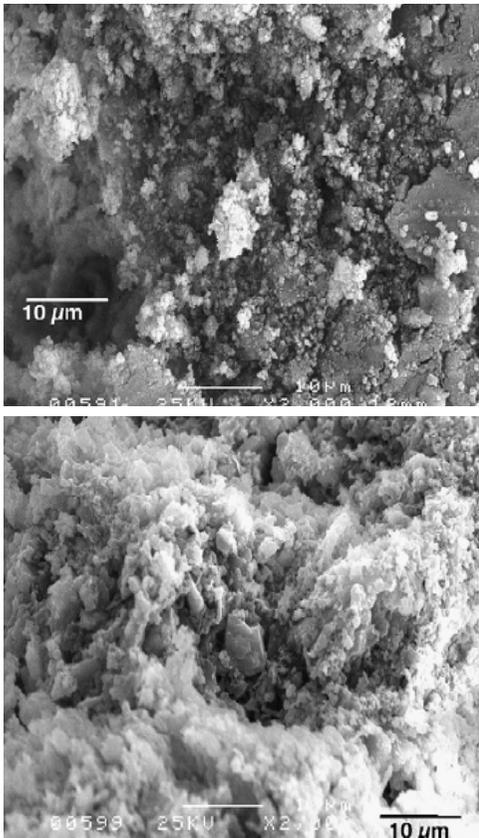


Figura 5.1: Microestrutura de duas argamassas de cal aérea (Lawrence et al., 2007)

De acordo com Lawrence (2007), o processo de carbonatação influencia a porosidade das argamassas de cal, observando-se um aumento do volume dos poros com $0,1 \mu\text{m}$ de diâmetro aquando da transição da fase de portlandite para a fase da calcite. Como estes poros não participam na

carbonatação porquanto dificultam o acesso de CO_2 isso explica porque o processo de carbonatação se pode arrastar durante vários anos.

Agostinho (2008) refere que a utilização do indicador de fenolftaleína padece de algumas limitações na avaliação do grau de carbonatação das argamassas de cal aérea, tendo observado casos de superfícies que parecem estar totalmente carbonatadas muito embora a sua resistência continue a aumentar, o que comprova que o processo de carbonatação ainda decorre.

O endurecimento da cal hidráulica abrange duas reacções. Na primeira dá-se a hidratação dos silicatos e dos aluminatos de cálcio, tanto na água como no ar. Na segunda ocorre a recarbonatação da cal apagada, só ao ar e na presença de dióxido de carbono (Coutinho, 2006).

Da análise da microestrutura de uma argamassa de cal hidráulica (Figura 5.2), verifica-se o aumento da dimensão e densidade das agulhas de silicatos de cálcio que vão tornando a estrutura mais coesa.

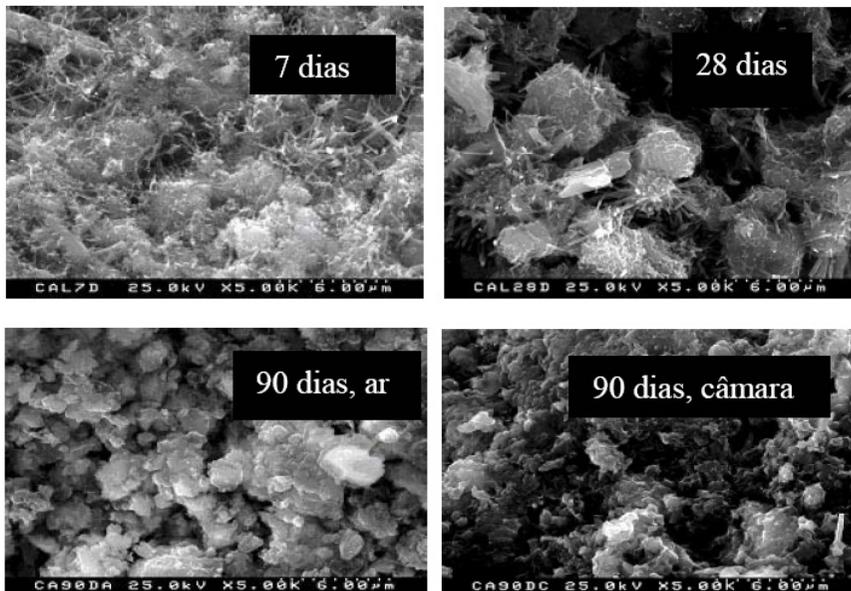


Figura 5.2: Microestrutura de uma argamassa de cal hidráulica com diferentes idades de cura e curadas em câmara e ao ar (Alvarez et al., 2005)

O aumento da coesão está também ligado à carbonatação da cal que ocorre a par da eliminação da água em excesso a partir dos 28 dias (Alvarez *et al.*, 2005).

Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma propriedade de um material ligante no estado fresco, que determina a facilidade com que esse material, pode ser misturado, colocado e compactado. Alguns autores referem também a capacidade de escoamento do material ligante como uma propriedade fundamental em termos de trabalhabilidade. O estudo de um material em termos da sua deformação e escoamento define a sua reologia. Este termo foi definido por Bingham em 1929, sendo originário da palavra grega *rhein* que significa escorrer, para caracterizar o estudo da deformação e escoamento da matéria. Não há infelizmente nenhum ensaio que consiga medir directamente o grau de trabalhabilidade de um material ligante, tendo sido desenvolvidos diferentes ensaios que medem diferentes parâmetros dos materiais ligantes.

Na medição da trabalhabilidade das argamassas é por vezes utilizado o reómetro sendo no entanto mais frequente o uso do ensaio de espalhamento (Figura 5.3).



Figura 5.3: Dispositivo para ensaio de espalhamento (EN 1015-3)

Alguns autores (Rago e Cincotto, 1999) estudaram a influência no tipo de cal na trabalhabilidade, concluindo que a dimensão das partículas de cal é característica que mais afecta a trabalhabilidade das pastas de cal. Observaram também que as cales dolomíticas necessitam de menos água de hidratação (70 a 80%) que as cales do tipo cálcico (100 a 130%).

A própria natureza dos agregados (fluviais ou britados) utilizados no fabrico das argamassas pode influenciar a sua trabalhabilidade.

Para Silva (2006) os finos associados aos agregados britados conduzem a um aumento da trabalhabilidade das argamassas com cal.

Estes resultados elucidam a diferença de comportamento comparativamente às argamassas de cimento, onde se observa que a utilização de agregados britados aumenta a viscosidade das argamassas, porquanto apresentam uma quantidade substancial de finos (10 a 25%) que conduz a um aumento da fricção entre as partículas (Westerholm *et al.*, 2008).

Na sua análise da literatura Rodrigues (2004), refere que cais aéreas com elevado tempo de extinção, apresentam melhores características físicas relacionadas com a trabalhabilidade e plasticidade, que se fica a dever a uma maior quantidade de material extinto e a uma maior superfície específica da cal.

Também Margalha *et al.* (2006), que estudaram cais aéreas com vários tempos de extinção entre (2h, 1mês, 7 meses e 5 anos), concluem que cais com elevado tempo de extinção são mais trabalháveis e requerem menos água.

Seabra *et al.* (2007) utilizaram um reómetro (Figura 5.4), para estudar a influência do uso de aditivos na trabalhabilidade de argamasas à base de cal hidráulica com razões mássicas ligante/agregado de 1:2, 1:3 e 1:5.

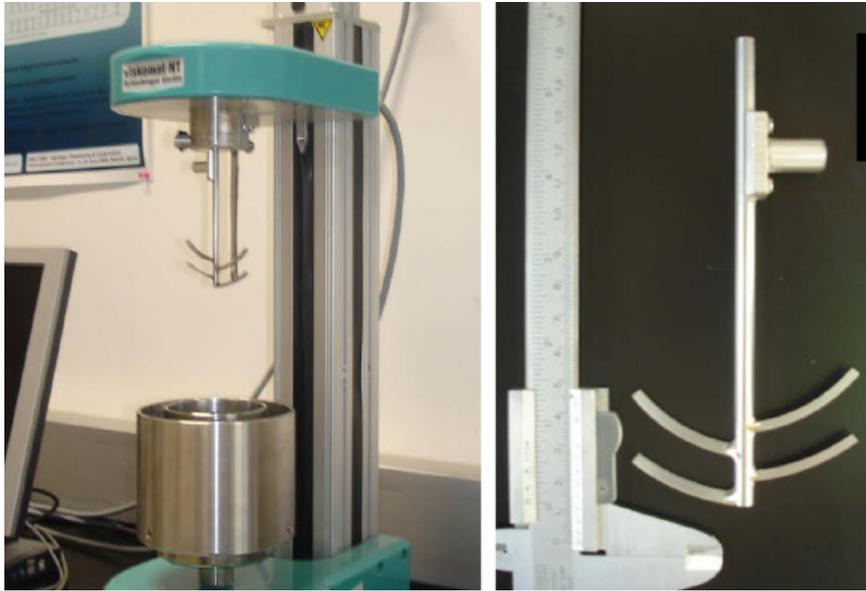


Figura 5.4: Reómetro e pormenor da haste rotativa (Seabra *et al.*, 2007)

Aqueles autores, concluíram que os agentes de retenção de água utilizados actuam como espessantes e diminuem o slump das argamassas, sendo que para valores de adição de 0,2% nem sequer é possível proceder à medição do slump. Já os aditivos de introdução de ar aumentam a trabalhabilidade das argamassas pela criação de microporos e permitem reduzir a água da mistura, sucedendo o mesmo efeito com a adição de superplastificantes.

Outros autores (Seabra *et al.*, 2009) analisaram a influência do uso de aditivos na trabalhabilidade de argamassas à base de cal aérea. As argamassas estudadas apresentavam uma razão ligante/agregado de 1:1 em volume, a que corresponde uma razão de 1:1,34 em termos mássicos. A investigação revelou que adição de agentes de retenção de água contribui para uma redução do slump, quando aquele aditivo é utilizado numa percentagem de 0,1%, no entanto quando é utilizada uma percentagem superior (0,15 a 0,2%) observa-se um aumento do slump que pode ficar a dever-se à redução da densidade.

Relativamente à utilização de superplastificantes observa-se que a utilização que a mesma contribui como acontece para a cal hidráulica para

um aumento da trabalhabilidade, sendo que a utilização de 0,15% conduz a uma situação de trabalhabilidade relativamente estável. Já sobre o efeito dos aditivos incorporadores de ar, constata-se que a sua influência está dependente da quantidade adicionada, sendo que somente a utilização de uma quantidade entre 0,1 a 0,15%, contribui comprovadamente para um aumento da trabalhabilidade das argamassas de cal aérea.

Retenção de Água

A retenção de água é uma propriedade muito importante, evitando a perda excessiva da água de amassadura da argamassa, por sucção, para os blocos ou tijolos. É também uma medida indirecta da plasticidade da cal, uma vez que as cals plásticas têm alta capacidade de retenção de água, embora o inverso nem sempre seja verdade. Esta propriedade é também importante para prolongar o estado plástico da argamassa fresca, aumentando a produtividade da mão-de-obra.

Green *et al.* (1999) comprovaram a elevada capacidade de retenção de água das argamassas de cal, quando comparadas com argamassas de cimento. Estes autores observaram que a adição de uma pequena quantidade de cimento a argamassas à base de cal reduz de forma significativa a capacidade de retenção de água destas.

Outros autores estudaram a influência da natureza dos agregados no comportamento de argamassas à base de cal, concluindo que a utilização de argamassas com agregados britados possuem menor capacidade de retenção de água que as argamassas com agregados de origem fluvial (Silva, 2006).

Retracção

A retracção ou contracção é uma propriedade relacionada com a diminuição de volume de uma argamassa, quer por evaporação da água da amassadura quer por fenómenos relacionados com a hidratação e carbonatação do ligante. A retracção é uma propriedade que condiciona de forma decisiva a durabilidade de uma argamassa, porquanto a fissuração por retracção permite o acesso de substancias agressivas que podem contribuir para a sua degradação. A análise da retracção pode ser feita por medição da variação das dimensões de provetes de argamassa (retracção livre) ou pela observação da existência ou não de fendilhação num reboco após a sua aplicação num determinado suporte (retracção restringida).

Rodrigues e Henriques (2003) observam que a retracção linear de argamassas com cal área (traço 1:2) aumenta com o tempo de extinção da cal. Sendo que argamassas de cal com um tempo de extinção de 16 meses apresentam quase metade da retracção de argamassas comerciais de cal hidratada.

Este comportamento é confirmado pelos resultados de Margalha *et al.* (2006) que observaram a existência de fissuração em rebocos com cal aérea de baixo tempo de extinção, sendo que os outros rebocos feitos com cal aérea com um tempo de extinção de 5 anos não apresentavam quaisquer fissuras.

Curiosamente, Sá (2005) refere que no livro “O Engenheiro Português”, da autoria do Engenheiro Militar Manoel de Azevedo Fortes e publicado em 1725, é evidente a importância da utilização de cal com longos tempos extinção, como se expõe na seguinte transcrição:

“...cal bem derregada, e melhor se for derregada em hum tanque particular, e sempre cuberta de agoa por algum tempo: os antigos a deixavão nos tanques hum anno, e maia.”

Agostinho (2008), menciona a utilização de um perfil metálico com 1 metro de comprimento (Figura 5.5) para medição da retracção linear, através da observação da argamassa de cal nos topos do perfil. Este autor constatou a ausência de fissuração por retracção neste ensaio, na utilização de argamassas de cal com traço 1:3.

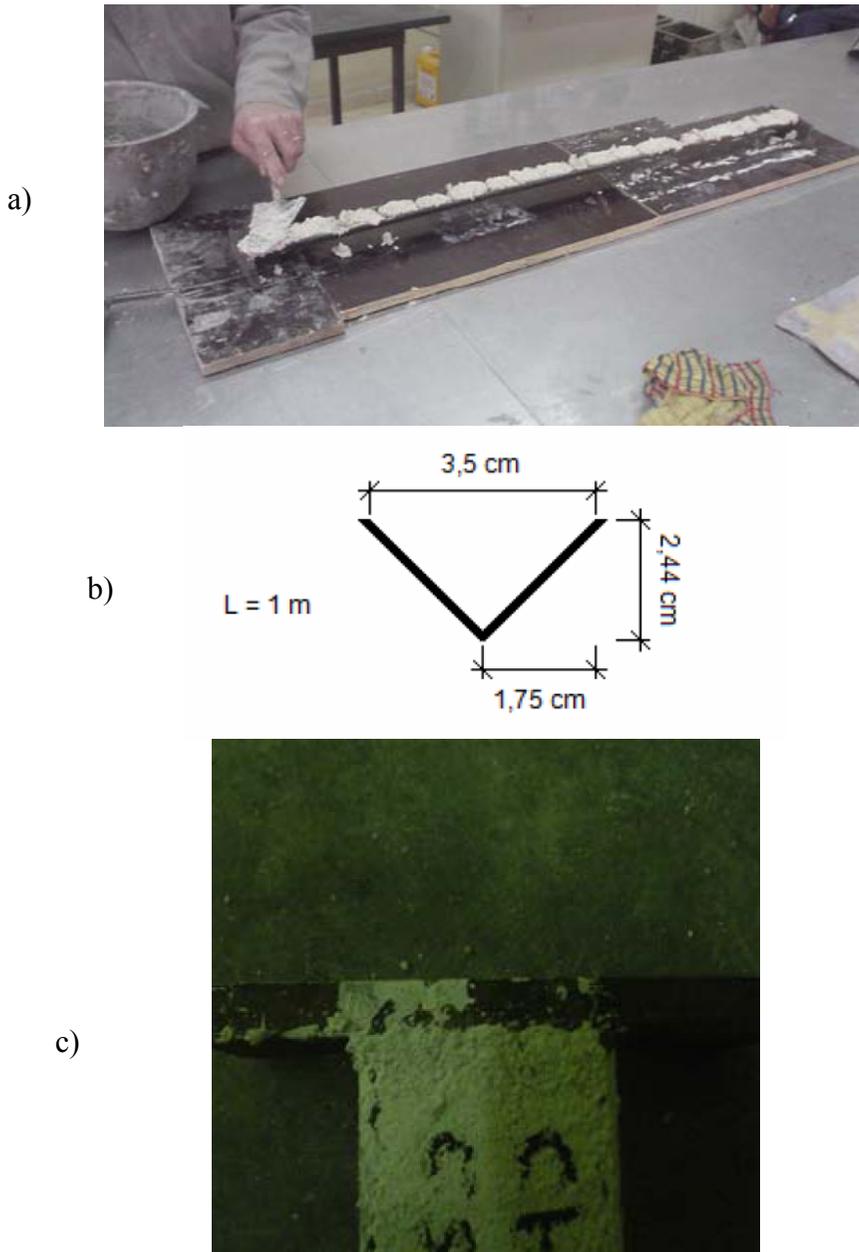


Figura 5.5: Ensaio de retracção com calha metálica: a) enchimento da calha com argamassa; b) dimensões da calha; c) topo da calha ao fim de 90 dias

Veiga e Souza (2004) entendem que a retracção restringida é aquela que mais caracteriza o comportamento de uma argamassa de revestimento. Segundo aquelas autoras, quando a argamassa é aplicada sobre um suporte, á medida que se dá a secagem, vai-se desenvolvendo a retracção que é restringida pela aderência ao suporte e que cria na argamassa um estado de tensão, sendo que quase sempre são estas tensões que provocam a fissuração e não as tensões de retracção. As autoras referem o desenvolvimento no LNEC, de um equipamento específico capaz de medir a retracção restringida (Figura 5.6).

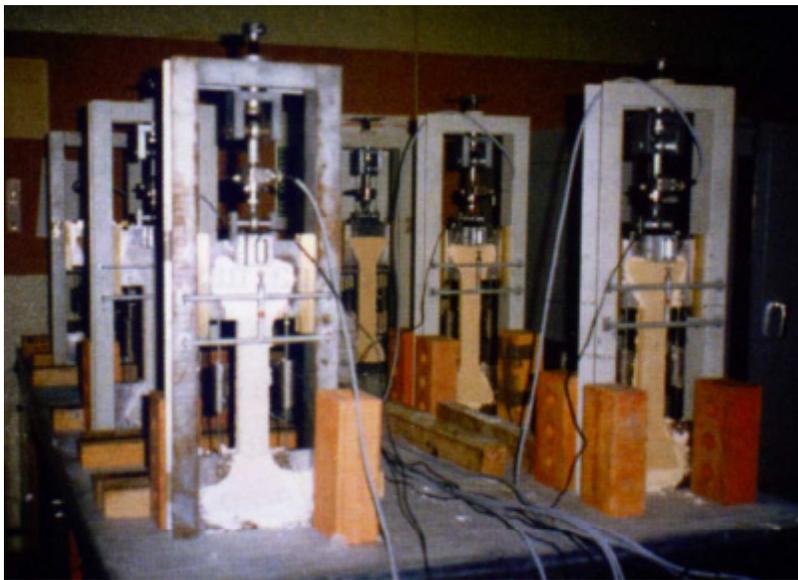


Figura 5.6: Ensaio de retracção restringida

De acordo com Veiga (1998), são os seguintes os parâmetros de análise de susceptibilidade por retracção restringida:

Fr - força máxima induzida pela retracção restringida;

G - energia de rotura à tracção;

CSAF - coeficiente de segurança à abertura da 1ª fenda;

CREf - Coeficiente de resistência à evolução da fendilhação:

$$CREf = G / Fr_{m\acute{a}x}$$

Na Tabela 5.1 apresenta-se uma classificação para a susceptibilidade à fendilhação.

Tabela 5.1: Susceptibilidade à fendilhação (Veiga, 1998)

Classe	1º critério - CSAF	2º critério - CREF (mm)
1 - Fraca susceptibilidade	> 1	> 1
2 - Média susceptibilidade	> 1	0,6 < CREF < 1
3 - Forte susceptibilidade	< 1	< 6

Resistência à Compressão

Aquilo que é o comportamento típico das argamassas à base de cal, em termos da sua resistência à compressão é perceptível na Figura 5.7.

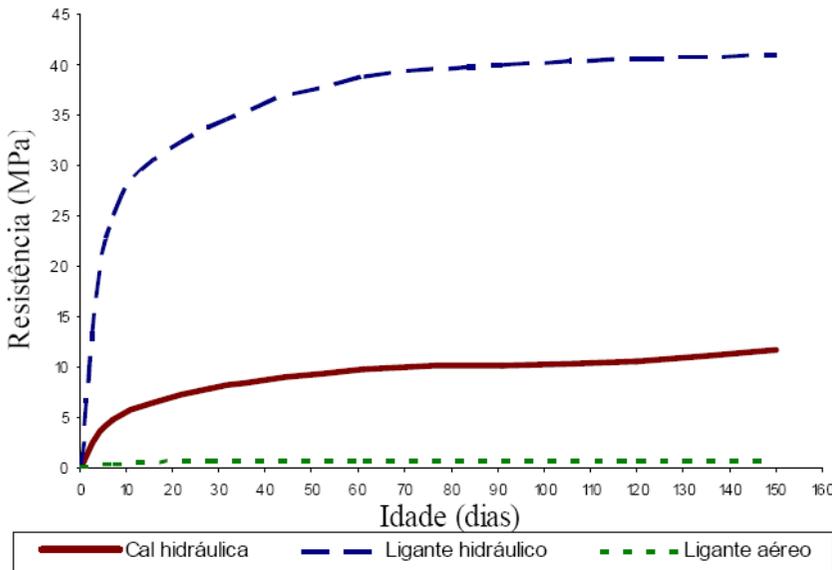


Figura 5.7:
Comportamento mecânico de argamassas com vários tipos de ligantes (Sequeira et al., 2007)

Como se pode constatar, a utilização de ligantes de cal (aéreos ou hidráulicos) origina argamassas com um baixo nível de resistência à compressão, por oposição à utilização de um ligante hidráulico como o cimento portland. Mesmo no que respeita à utilização de argamassas com cal hidráulica, o comportamento destas está associado a um nível de resistência bastante superior ao comportamento das argamassas à base de cal aérea. Os próprios limites regulamentares previstos para as cais hidráulicas (HL) e para as cais hidráulicas naturais (NHL) (Tabela 3.2) evidenciam a baixa resistência deste ligante.

Sá (2005) levou a cabo uma revisão bibliográfica sobre as resistências das argamassas de reboco à base de cal, concluindo que para as argamassas à base de cal aérea esse parâmetro não excede em caso algum 1MPa, sendo que os rebocos à base de cal hidráulica não excedem 2,5 MPa.

Para cada tipo de cal existem vários sub-factores que influenciam a resistência das argamassas. Alguns autores comprovam que por exemplo a utilização de agregados de maiores dimensões conduz a maiores resistências mecânicas das argamassas (Genestar e Pons, 2003; Henriques e Rodrigues, 2008).

Silva (2006) conclui que a utilização de agregados britados conduz a argamassas com maior resistência mecânica do que quando se utilizam agregados de origem fluvial. Para outros autores nas argamassas com cal aérea, a maior resistência mecânica está associada a argamassas mais porosas, pois facilitam o processo de carbonatação (Rato, 2006).

De acordo com Hanley e Pavia (2008) a resistência máxima das argamassas à base de cal hidráulica NHL (2, 3 e 5), não é obtida nos três casos para o mesmo valor de diâmetro de espalhamento de 185 mm (Figura 5.3) como sugere a norma aplicável NP EN 459:2. De facto para o mesmo valor de diâmetro de espalhamento, estão associados diferentes valores de teor de água para cada uma das cais. De acordo com estes autores, enquanto que para a argamassa com cal NHL 5 o valor de espalhamento de 185 mm corresponde a uma quantidade de água que maximiza a resistência, já para a argamassa com cal NHL 3,5 o valor de espalhamento associado à resistência máxima, situa-se entre 165 e 185mm. Já para a argamassa com cal NHL 2 esse valor é de 165mm.

Henriques e Rodrigues (2008) concluem que enquanto que a utilização de diferentes processos de amassadura (prescritas em diferentes normas) de argamassas de cal aérea não influenciam a resistência mecânica, já para

argamassas com pozolanas essa influência é significativa. Fenómeno idêntico tem lugar na utilização de diferentes condições de cura, obtendo-se diferentes resistências mecânicas para argamassas só com cal aérea ou com pozolanas consoante a cura seja feita em câmara saturada (BS) ou com HR a 50% (CSTB).

Ductilidade

Rodrigues (2004), define ductilidade de argamassas à base de cal, como o quociente entre a resistência à flexão e a resistência à compressão. Em termos empíricos é possível relacionar a resistência à compressão com o módulo de elasticidade, facto que pode explicar o estabelecimento de uma referência entre a resistência mecânica e a deformabilidade de um material, permitindo uma inferência aproximada desta propriedade sem recurso ao ensaio relativamente moroso da obtenção do módulo de elasticidade estático.

Este parâmetro é pouco referido na literatura, contudo não deixa de se revelar como um indicador que merece algum interesse. Alguns autores obtiveram valores de ductilidade aos 60 dias de cura a variar entre 0,5 a 0,63 para argamassas com elevado tempo de extinção, sendo que esses valores se reduziam ligeiramente para os 90 dias de cura (Rodrigues e Henriques, 2003).

Sá (2005) refere valores a variar entre 0,43 a 0,52 para argamassas de cal aérea ao traço 1:3 com 90 dias de cura. Este autor menciona valores à volta de 0,30 para argamassas de cal hidráulica ao traço 1:4 com 28 dias de cura.

Guerreiro *et al.* (2007) referem valores de ductilidade à volta de 0,40 para argamassas com 60 dias de cura. Já Agostinho (2008) refere a obtenção de valores de ductilidade entre 0,35 a 0,40 para argamassas de cal aérea, extinta em laboratório.

Para Sequeira *et al.* (2007) este parâmetro permite distinguir o comportamento da natureza do ligante, já que quanto maior a hidraulicidade do ligante menor é a sua ductilidade (Figura 5.8).

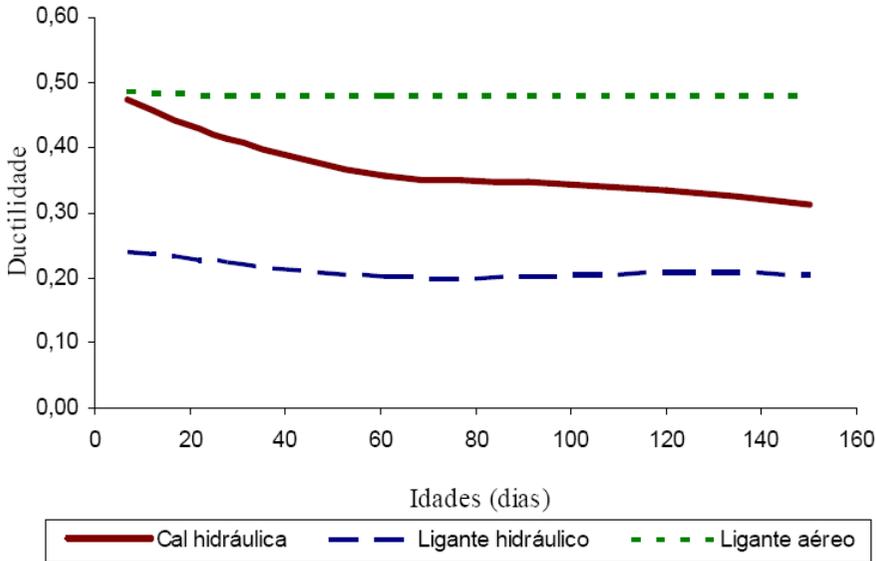


Figura 5.8:
Ductilidade de argamassas

Módulo de elasticidade

O módulo da elasticidade das argamassas é o parâmetro que verdadeiramente permite aferir da sua deformabilidade e da capacidade daquelas para acomodarem deformações das alvenarias de pedra em edifícios antigos. Diversos autores referem valores do módulo de elasticidade dinâmico, obtido através da utilização de um equipamento de ultra-sons (Figura 5.9).

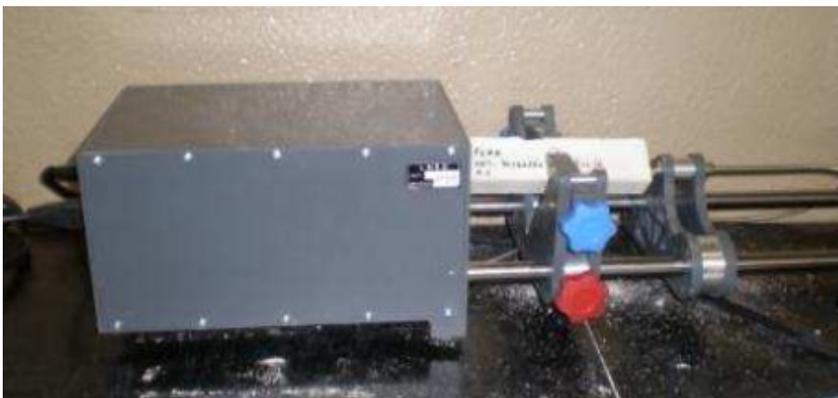


Figura 5.9:
Equipamento para medição do módulo de elasticidade dinâmico

Rodrigues e Henriques (2003) mencionam módulos de elasticidade (dinâmicos) de argamassas de cal com elevado período de extinção e 60 dias de cura a variar entre 1150 MPa e 2050MPa.

Outros autores estudaram a influência da natureza do agregado no módulo de elasticidade (dinâmico) das argamassas de cal, concluindo que a utilização de agregados de origem fluvial é responsável por menores módulos de elasticidade. Também que as argamassas contendo só cal hidráulica (traço 1:4) apresentam menor módulo de elasticidade que argamassas com dois ligantes, cal aérea e cal hidráulica (Rodrigues *et al.*, 2007).

Guerreiro *et al.* (2007) observam que as argamassas só com cal aérea (traço 1:3) apresentam um módulo de elasticidade dinâmico de 2350 MPa, mais elevado, comparativamente ao módulo de elasticidade de argamassas com substituição de 25% de cal aérea por cal moderadamente hidráulica (1860 MPa), mais ainda quando o valor de substituição é de 50% (1840 MPa). Estes autores registam um módulo de elasticidade de 2330 MPa, para argamassas contendo somente como ligante uma cal moderadamente hidráulica (traço 1:3).

Alguns autores (Almeida *et al.*, 2007) referem um valor de módulo de elasticidade dinâmico de 2130 MPa para uma argamassa com uma cal aérea (CL 90) ao traço 1:2. Estes autores mencionam variações no módulo de elasticidade dinâmico de 2720 MPa para 680 MPa, em argamassas com cal aérea e um aditivo pozolânico e em que a única variável foi o tipo de cura utilizado. No primeiro caso foi utilizada uma cura dita normal (65% HR e 20° C), já no segundo caso foi utilizada uma cura húmida (95% HR e 20° C).

Porosidade, Capilaridade e Permeabilidade ao Vapor

Para alguns autores a durabilidade das argamassas de cal está relacionada com a sua porometria e estrutura porosa, a qual vai condicionar o comportamento à água daquelas, condicionando de que forma se processará quer o contacto com a fase líquida (absorção) quer a secagem dessa mesma fase por evaporação (permeabilidade ao vapor).

Rodrigues e Henriques (2003), referem ter obtido valores de porosidade aberta em argamassas de cal aérea ao traço 1:2, os quais variam em função do tempo de extinção da cal, 35% para uma cal viva com tempo de extinção de 10 meses e 40% para um tempo de extinção de 16 meses. Estes autores referem que o coeficiente de absorção de água por capilaridade e o valor assintótico, aumentam com o tempo de extinção da cal, entre 0,32 e 1,3 Kg/(m².s^{0,5}).

Enquanto que a porosidade aberta está relacionada ao valor assintótico de absorção de água por capilaridade, já o coeficiente de capilaridade tem que ver com a dimensão dos poros e com a conectividade da rede porosa (Rato, 2006).

Sá (2005) menciona valores de coeficiente de absorção por capilaridade para argamassas de cal aérea ao traço 1:3 entre 0,8 e 1,3 Kg/(m².s^{0,5}) . Já para as argamassas de cal hidráulica, este valor sobe para próximo de 1,8 Kg/(m².s^{0,5}).

Pavia e Treacy (2006) apresentam uma síntese de valores médios de porosidade obtidos em argamassas de cal de edifícios históricos (Tabela 5.2).

Tabela 5.2: Valores médios de porosidade de argamassas de edifícios históricos (Pavia & Treacy, 2006)

Data/Fonte	Porosidade (%)
Séc. XII - Catedral, Irlanda	33 - 41
Séc. XII - Igreja, Irlanda	21 - 41
Séc. XI/XIV - Igreja, Espanha	21 - 45
Séc. XV - Catedral, Espanha	7 - 35
Séc. XV - Igreja, Espanha	15 - 31
Séc. XVI - Catedral, Espanha	12 - 38
Séc. XI/XVI - Igreja, Espanha	34 - 35
Séc. XVII - Castelo, Irlanda	32 - 36
Séc. XVIII - Hospital, Irlanda	30 - 44
Séc. XVIII - Castelo, Irlanda	30 - 33
Séc. XVIII - Catedral, Espanha	35 - 53

Guerreiro *et al.* (2007), observaram que o aumento do teor de substituição de cal aérea por cal hidráulica, aumenta a absorção de água por capilaridade das argamassas, variando entre 0,24 e 0,30 Kg/(m².s^{0,5}). Estes autores referem valores de porosidade aberta de 33,8% para uma argamassa de cal aérea ao traço 1.3 e de 29,9% quando o ligante é uma cal moderadamente hidráulica (NLH 3,5 Z). Já relativamente à permeabilidade ao vapor de água, estes autores referem que o aumento da substituição de cal aérea por cal hidráulica, conduz a uma diminuição daquele parâmetro.

Outros autores estudaram o comportamento à água, de argamassas bastardas de cal aérea e cimento, concluindo que a porosidade aumenta com a percentagem de incorporação de cal aérea. Estes autores referem que os maiores coeficientes de capilaridade são apresentados por argamassas com ligantes exclusivamente hidráulicos, cal e cimento portland. No que respeita á permeabilidade ao vapor de água, observa-se que este parâmetro aumenta com a incorporação de cal aérea (Rodrigues *et al.*, 2007).

Segundo Henrique e Rodrigues (2008), argamassas com areias mais grossas conduzem a menor porosidade e a menor absorção por capilaridade. Estes

autores afirmam contudo que este comportamento não é independente do tipo de ligante utilizado, tendo observado um comportamento distinto em termos da porosidade e absorção capilar das argamassas quando se utiliza um ligante aéreo (Lafarge) (Figura 5.10).

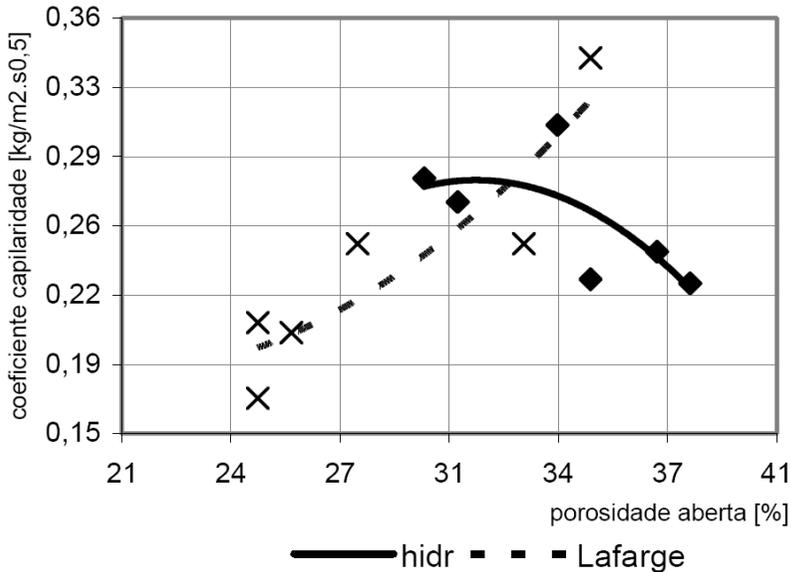


Figura 5.10:
Capilaridade versus
porosidade aberta
(Henriques &
Rodrigues, 2008)

No LNEC foi desenvolvido um equipamento designado por humidímetro que permite avaliar o tempo que a água da chuva leva a atingir um suporte e o tempo para a sua posterior secagem (Gonçalvez & Veiga, 1994). O humidímetro baseia-se na variação da resistência eléctrica dos materiais com o teor de água. Inicialmente colocam-se as sondas sobre o suporte que é depois revestido com o reboco que se pretende avaliar. Após um determinado tempo de cura, aplica-se uma determinada altura de água sobre a superfície e mede-se a evolução da molhagem. A segunda fase do ensaio consiste no registo da evolução da secagem dos provetes (5.11).

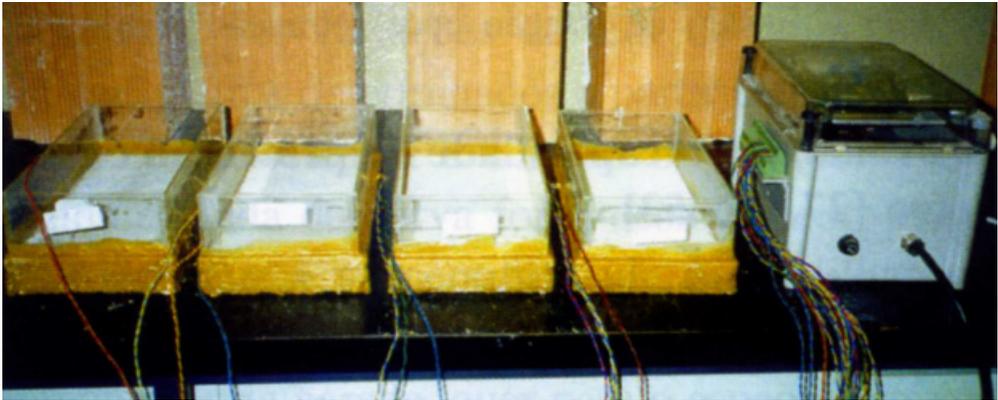


Figura 5.11: Ensaio de argamassas com o humidímetro (Veiga et al., 2004)

Os parâmetros avaliados no humidímetro são os seguintes:

1º atraso na molhagem (M), período de tempo entre a aplicação da água e a sua chegada ao suporte expresso em horas;

2º período de humedecimento (S), período de tempo durante o qual o suporte permanece humedecido expresso em horas;

3º intensidade da molhagem (H), área situada entre a linha que define a variação da tensão eléctrica em função do tempo e a linha correspondente a 95% da tensão inicial, expresso em Mv.h

Sá (2005) cita vários resultados do desempenho à água em argamassas de cal, obtidos através do humidímetro (Tabela 5.3):

Tabela 5.3: Avaliação do comportamento à água com o humidímetro (Sá, 2005)

Composição da argamassa de cal	Idade	Parâmetros		
		M (h)	S (h)	H (mV.hx10 ⁻³)
Argamassa de cal aérea com areia siliciosa ao traço 1:3	28	0,17	30	9,24
Argamassa de cal aérea com gordura e areia ao traço 1: 3	28	3,12	80,76	12,61
Argamassa de cal aérea com areia de rio ao traço 1: 3	28	0,10	90	15,26

Resistência à acção de sais solúveis

De um ponto de vista da durabilidade de uma argamassa é muito importante que este seja resistente à acção dos sais solúveis, nomeadamente aos cloretos e aos sulfatos.

Rodrigues (2004) constata que argamassas de cal aérea ao traço 1:2 apresentam um melhor desempenho na resistência aos cloretos, concluindo que este parâmetro não depende fundamentalmente da resistência das argamassas.

Alguns autores (Rodrigues e Henriques, 2003) observaram que o tempo de extinção da cal aérea aumenta a resistência aos sulfatos das argamassas. Estes autores referem perdas de massa no ensaio de resistência aos sulfatos entre 30 a 40% em argamassas à base de cal aérea com 90 dias de cura (Figura 5.12).

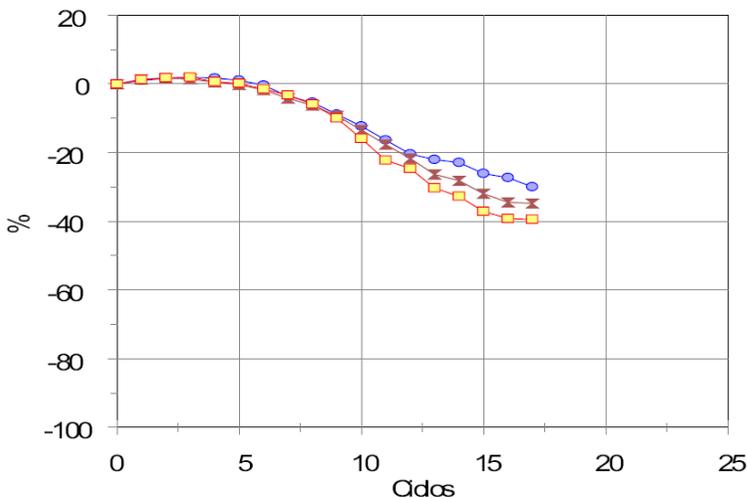


Figura 5.12: Perda de massa de argamassas de cal sujeitas a ciclos de exposição em solução com sulfato de sódio (Rodrigues & Henriques, 2003)

Guerreiro *et al.* (2007) observaram que a degradação de argamassas com vários tipos de ligantes, face à acção dos sulfatos é decrescente com o aumento da substituição de cal aérea por cal hidráulica. Estes autores referem que na exposição dos provetes de argamassa com 60 e 120 dias de cura, a uma solução com cloreto de sódio tem lugar um fenómeno idêntico, sendo que para argamassas com 60 dias de cura, a resistência é

particularmente baixa quando o ligante é exclusivamente cal aérea (A1) ou mesmo com 25% de substituição por cal hidráulica (A2) (Figura 5.13).

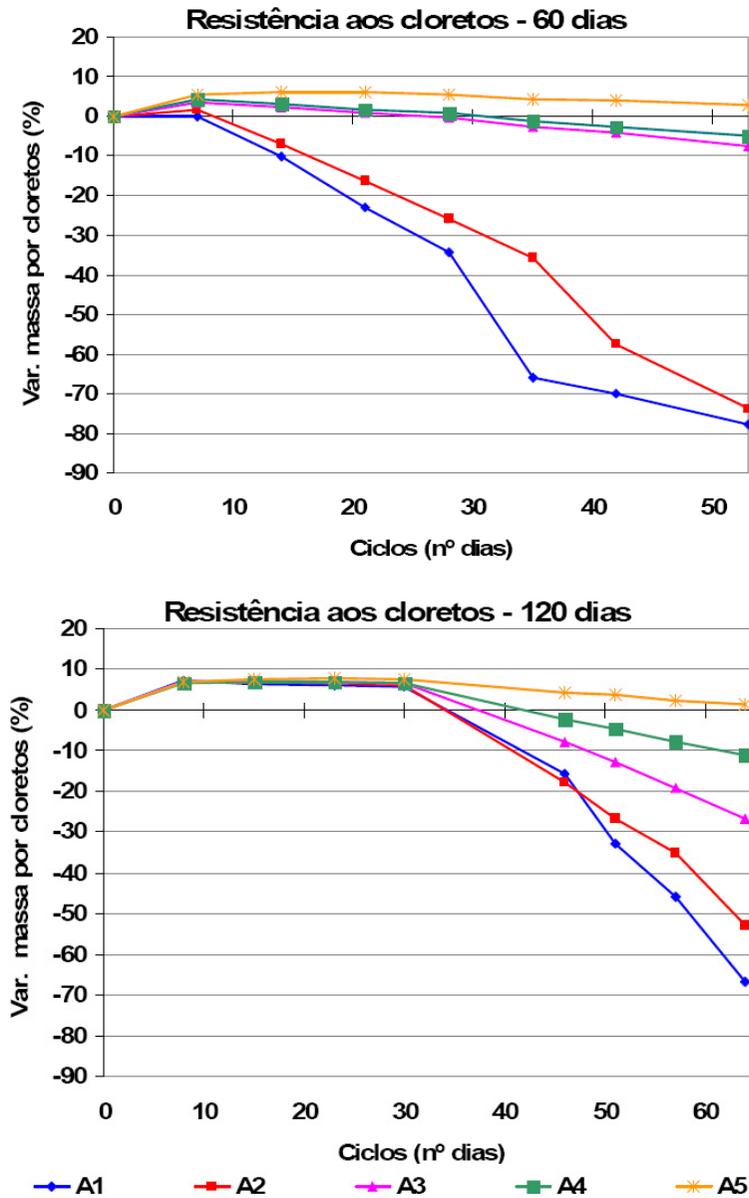


Figura 5.13: Perda de massa de argamassas de cal sujeitas a ciclos de exposição em solução com cloretos (Guerreiro et al., 2007)

6

A Cal na Reabilitação de Edifícios

Considerações Gerais

Caracterização das Argamassas Antigas

Argamassas de Restauro à Base de Cal

Considerações Gerais

Muito embora no caso específico dos edifícios que constituem o património edificado classificado, a vertente cultural se torne preponderante e condicionante das acções de preservação, entendemos que mesmo as acções levadas a cabo em edifícios que caem fora desta classificação devem ter sempre presente esta vertente, porquanto deve sempre que possível tentar-se inculcar no cidadão comum que o primado da preservação/reabilitação, deve impor-se sempre que possível à substituição integral por novos elementos. Por um lado pela sustentabilidade que subjaz a uma tal opção de poupança de recursos e por outro pela memória que constitui também um valor a preservar.

As acções com vista à preservação de edifícios foram durante os dois últimos séculos, pautadas por juízos de valor bastantes distintos entre si. Enquanto que a escola francesa, teorizada por Eugene Emmanuel Violet-le-Duc (1814-1879), defendia o “*gosto pelo aspecto novo*”, caracterizado por operações de restauração radicais e descaracterizadoras. Já no extremo oposto situa-se a linha iniciada por John Ruskin (1819-1900) e continuada por Camille Boito (1836-1914) e Cesare Brandi (1906-1988), que incorpora o espírito da escola italiana, assente no primado da autenticidade e na preservação das técnicas e materiais originais (Henriques, 2003).

Existem ainda dois outros elementos fundamentais que importa ter presente para se poder compreender o espírito de uma correcta acção de preservação e que são respectivamente a Carta de Atenas (1931) e a Carta de Veneza (1964).

A Carta de Atenas constitui um documento que libertando-se das amarras personalizadas das linhas teóricas de restauração, contribui para institucionalizar a nível internacional a necessidade de preservação do património edificado de cada país, contribuindo para o efeito com um

conjunto elementar de recomendações que primam pela necessidade de operações de restauração mínimas e por conceitos como o da reversibilidade das intervenções.

Já a Carta de Veneza, estruturada em 16 artigos constitui uma consolidação e um aprofundamento dos princípios da conservação, já não considerando o cimento portland como um material preferencial em termos de reabilitação, como o fizera a Carta de Atenas, mas antes aceitando materiais e técnicas modernas cuja eficácia esteja cientificamente comprovada (Henriques, 2003a).

Os trabalhos de reabilitação de revestimentos em edifícios antigos devem ser precedidos de uma análise quer da profundidade da degradação quer mesmo do valor histórico ou artístico do imóvel a reabilitar.

Segundo Veiga (2006), em casos de imóveis de valor histórico relevante a primeira opção deve passar sempre pela conservação do revestimento antigo através de operações de manutenção. Caso tal não seja possível pode optar-se por uma operação de consolidação. Caso o nível de degradação assim o obrigue poderá haver lugar a uma operação de substituição parcial, sendo que a substituição total será sempre a última operação a considerar.

A mesma autora sugere a matriz da Tabela 6.1 para facilitar o processo de decisão sobre o tipo de intervenção a efectuar (Veiga, 2003).

Tabela 6.1: Critérios gerais de decisão sobre o tipo de intervenção (Veiga, 2003)

Tipo de Degradação	Valor Histórico, Arquitectónico ou Artístico	Opção de intervenção	Seleção dos Materiais	Seleção das Técnicas	Outras Exigências
Degradação Superficial Pontual	Elevado	Conservação e se necessário consolidação	Materiais compatíveis e idênticos	Técnicas tradicionais e especializadas	Reversibilidade; aspecto idêntico
	Reduzido	Conservação e se necessário reparação localizada	Materiais compatíveis do ponto de vista funcional e de aspecto	-	Reversibilidade; aspecto compatível
Degradação Superficial Generalizada	Elevado	Conservação e se necessário consolidação	Materiais compatíveis e idênticos	Técnicas tradicionais e especializadas	Reversibilidade; aspecto idêntico
	Reduzido	Conservação e reparação localizada	Materiais compatíveis do ponto de vista funcional e de aspecto	-	Reversibilidade; aspecto compatível
Degradação Profunda Pontual	Elevado	Conservação, consolidação e reparação localizada	Materiais compatíveis e idênticos	Técnicas tradicionais e especializadas	Reversibilidade; aspecto idêntico
	Reduzido	Substituição parcial	Materiais compatíveis do ponto de vista funcional e de aspecto	Técnicas de aplicação de acordo com as regras da boa arte	Reversibilidade; aspecto compatível
Degradação Profunda Generalizada	Elevado	Consolidação	Materiais compatíveis e idênticos	Técnicas tradicionais e especializadas	Reversibilidade; aspecto idêntico
	Reduzido	Substituição integral	Materiais compatíveis do ponto de vista funcional e de aspecto	Técnicas de aplicação de acordo com as regras da boa arte	Reversibilidade; aspecto compatível

Caracterização das Argamassas Antigas

Qualquer trabalho de restauração deve ser precedido de uma inspecção dos materiais a restaurar, até porque sendo as alvenarias bastante irregulares, o seu revestimento com argamassa implicaria na maior parte dos casos uma elevada heterogeneidade de espessuras, facto que não pode ser esquecido aquando da operação de restauração.

Para lá daquilo que pode ser o valor histórico implícito na utilização de técnicas e materiais originais, surge a questão não dispicienda da compatibilidade entre os materiais de restauração e os materiais a restaurar. Na verdade, materiais com diferentes comportamentos mecânicos e físico-químicos, levarão mais tarde ou mais cedo a situações de mau desempenho.

Como se compreende, materiais com diferentes permeabilidades, diferentes módulos de elasticidade, diferentes níveis de aderência, diferentes níveis de absorção de água ou mesmo com ou sem fibras vegetais ou animais, dificilmente poderão constituir-se como uma boa solução de reabilitação, porquanto virão mais tarde ou mais cedo a estar na origem do aparecimento de patologias.

Como comprovam (Genestar e Pons, 2003; Henriques e Rodrigues, 2008), a simples alteração da granulometria dos agregados é por si só suficiente para alterar o desempenho de uma argamassa. Já que agregados mais grossos conduzem a maiores resistências mecânicas e a menores porosidades e absorções capilares, o que dá bem a ideia, da inúmera quantidade de variáveis que podem contribuir para o mau desempenho de uma solução de restauração.

Na Tabela 6.2, apresenta-se uma listagem dos ensaios a efectuar para caracterização de uma argamassa antiga.

Tabela 6.2: Caracterização de argamassas antigas (Marques, 2005)

Objectivo	Tipo de análise	Técnica de caracterização
Determinação da distribuição granulométrica	-	Crivagem - Distribuição granulométrica
Determinação das propriedades físicas	-	<p>Massa volúmica aparente e porosidade - Saturação total em água e pesagem hidrostática</p> <p>Distribuição porosimétrica - porosimetria de intrusão de mercúrio</p> <p>Resistências à tracção, compressão, flexão; módulos de elasticidade; aderência - ensaios mecânicos</p> <p>Coeficiente de capilaridade, resistência a ciclos gelo-degelo, resistência a sais solúveis - observação da evolução a condições adversas</p>
Caracterização química e microestrutural	Análise química	<p>Por via húmida - Dissolução e determinação dos elementos (resíduo insolúvel, gravimetria e volumetria)</p> <p>Por via instrumental - Espectrofotometria de absorção atómica, espectrofotometria de emissão de plasma</p>
	Análise microestrutural	Microscopia óptica, microscopia electrónica de varrimento (SEM), microanálise química (EDX)
	Análise mineralógica	Difracção de raios X (DRX)
	Análise térmica	Termogravimetria (TG), Analise térmica diferencial (ATD)
	Análise orgânica	Espectroscopia de infravermelhos por transformadas de Fourier (FTIR)

Sobre a questão da caracterização de argamassas antigas, o LNEC recomenda uma estruturação de procedimentos um pouco diferente que é apresentada na Figura 6.1 (Veiga *et al.*, 2004).

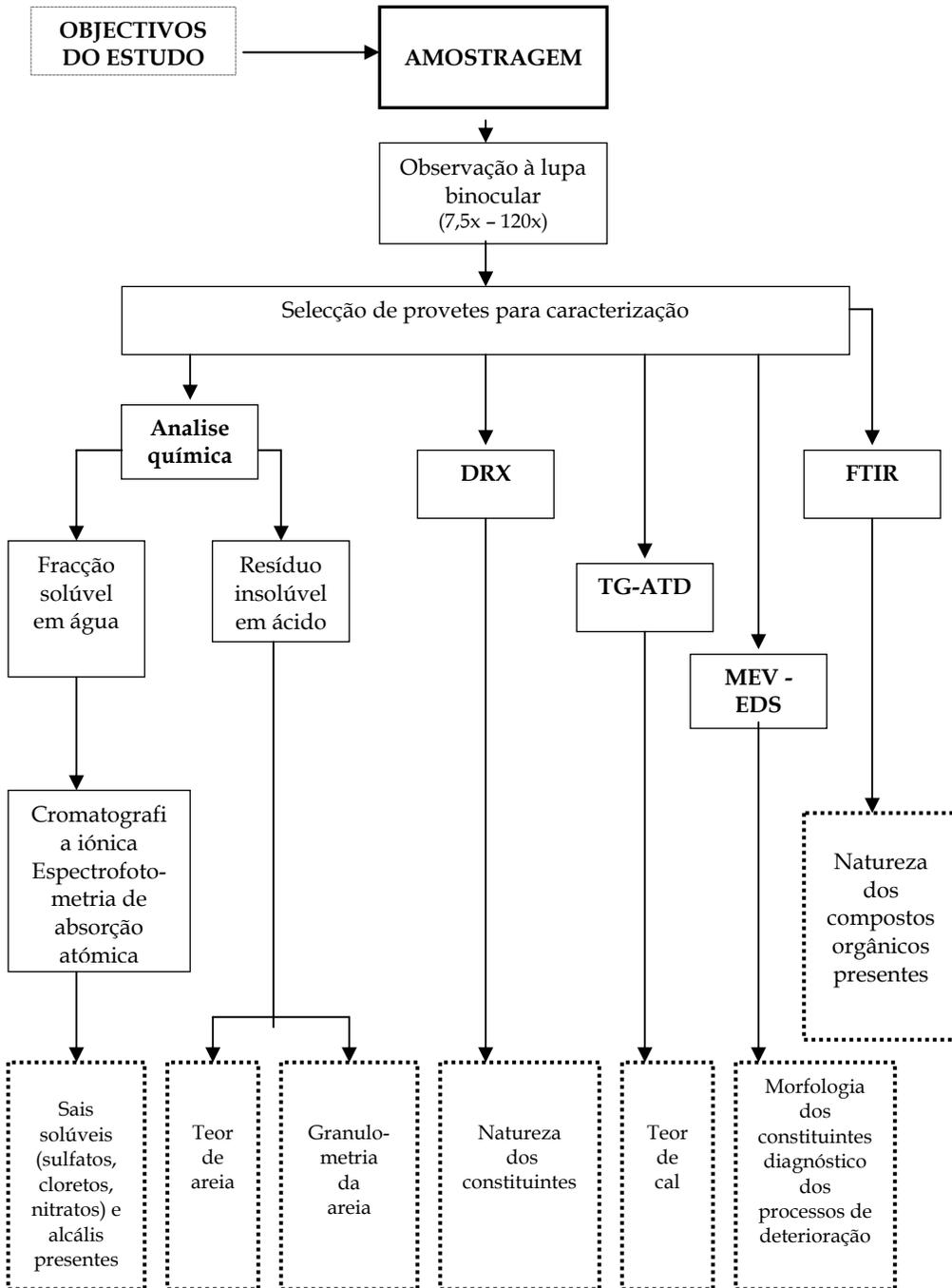


Figura 6.1: Metodologia de caracterização de argamassas antigas seguida no LNEC (Veiga et al., 2004)

Um dos problemas relacionados com a determinação das propriedades de argamassas antigas tem que ver com o facto de se utilizarem fragmentos não normalizados (Figura 6.2).

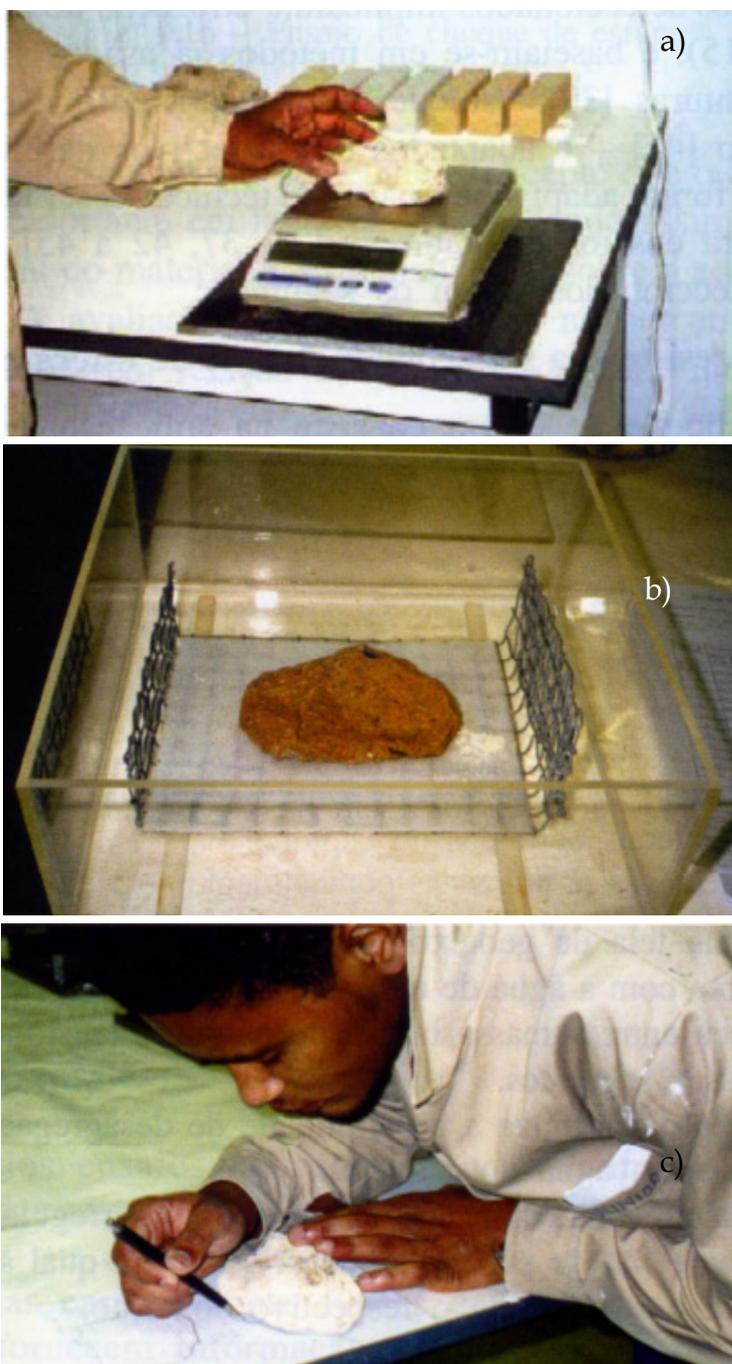


Figura 6.2: Caracterização das propriedades de um fragmento de argamassa: a) pesagem; b) análise da capilaridade; c) medição da área de contacto com a água (Veiga et al., 2004)

A resistência à compressão de fragmentos de argamassa de edifícios antigos, pode ser levada a cabo com uma argamassa de confinamento ao traço 1:3 com dimensões regulares de 40x40mm². A caracterização das propriedades

de argamassas de edifícios antigos não dispensa a avaliação “*in situ*” das suas propriedades físicas e mecânicas. Para esse efeito existem vários ensaios que se podem subdividir consoante o seu grau de intrusão em ensaios:

- Não destrutivos: avaliação da permeabilidade em baixa pressão com tubos Carsten (Figura 6.3 c); avaliação do módulo de elasticidade com ultra-sons;
- Semi-destrutivos e destrutivos: análise da resistência e deformabilidade com ensaio de choque de esfera (Figura 6.3 a) e de penetração controlada (Figura 6.3 b) e avaliação da aderência através do ensaio de resistência ao arrancamento (Figura 6.3 d)

Ensaio de choque da esfera – consiste na aplicação de um choque de uma esfera com 50mm de diâmetro. A resistência ao choque é avaliada a partir do diâmetro da moça e do tipo de degradação resultante do choque;

Ensaio de penetração controlada – consiste em provocar a penetração de um prego de aço com uma escala graduada em mm, com vários choques e registar a penetração após cada choque;

Tubos de Carsten – consiste em colar um conjunto de tubos com água a um troço de parede e medir a quantidade de água absorvida pela parede numa determinada quantidade de tempo, o ensaio destina-se a medir a permeabilidade à água sob baixa pressão

Ensaio de resistência ao arrancamento – consiste na determinação da força necessária para provocar o arrancamento do reboco, para esse efeito realizam-se incisões no reboco (circulares ou quadrangulares), em seguida cola-se uma pastilha metálica ao reboco que é depois ligada a um dinamómetro que faz o arrancamento.



Figura 6.3: Ensaios de caracterização de argamassas “in situ”: a) ensaio de choque de esfera; b) ensaio de penetração controlada; c) ensaio de tubo carsten; d) ensaio de resistência ao arrancamento (Veiga, 2003).

Para o ensaio de choque com esfera em argamassas antigas, Veiga *et al.* (2004) referem a obtenção de mossas com diâmetros entre 6 a 14 mm. Sá (2005) refere diâmetros de 19 mm obtidos em argamassas de edifícios do Bairro do Castelo em Lisboa, as quais foram executadas com cal aérea D. Fradique (para um tempo de cura de 3 meses). Esse valor baixa para 9,3 mm quando se analisam argamassas bastardas de cal e cimento com 3 anos em edifícios da mesma zona. Já para o ensaio de penetração controlada em

argamassas de cal de edifícios antigos, Veiga *et al.* (2004) obtiveram penetrações no 1º choque entre 0 e 6 mm e entre 2 a 4 no 2º choque.

Sá (2005) estudou o desempenho de diversas argamassas com cal com 152 dias de cura, aplicadas em revestimento de muros de alvenaria de pedra, tendo obtido os seguintes valores para a resistência ao choque de esfera e para a resistência ao arrancamento (Tabela 6.3):

Tabela 6.3: Resistência ao choque de esfera e ao arrancamento (Sá, 2005)

Composição da argamassa	Areia e cal aérea D. Fradique	Areia e cal aérea corrente	Areia e cal hidráulica
Diâmetro da moça (mm)	18,6	20,7	12,6
Resistência (MPa)	0,048	0,056	0,057

Em termos do ensaio de resistência ao arrancamento por tracção, Sá (2005) refere valores da literatura de 0,04 e 0,08 MPa para argamassas de cal aérea em suportes de tijolo isolado e de 0,12 e 0,17 para argamassas de cal hidráulica, respectivamente em suporte de tijolo isolado e em alvenaria de tijolo. Este autor alerta para o facto do suporte de tijolo ser mais liso que as alvenarias de pedra e logo implicar menores valores de aderência, também que os rebocos humedecidos apresentam menor resistência ao arrancamento. O mesmo autor obteve para o ensaio de absorção de Carsten, valores de 0,1 cm³ para argamassas de cal com gorduras tanto aos 10 como aos 60 minutos, obtendo para argamassas de cal aérea respectivamente 36,1 e 112,5 cm³, sendo que para argamassas de cal hidráulica esses valores são de 2,1 e 9,6 cm³. Já Magalhães *et al.* (2007) refere um valor de absorção de 2,3 cm³ em argamassas de cal aérea e cal hidráulica após 60 minutos. Relativamente à composição das argamasas antigas, a parte da identificação dos agregados é relativamente simples e Marques (2005) sugere a seguinte metodologia para o efeito (Figura 6.4):

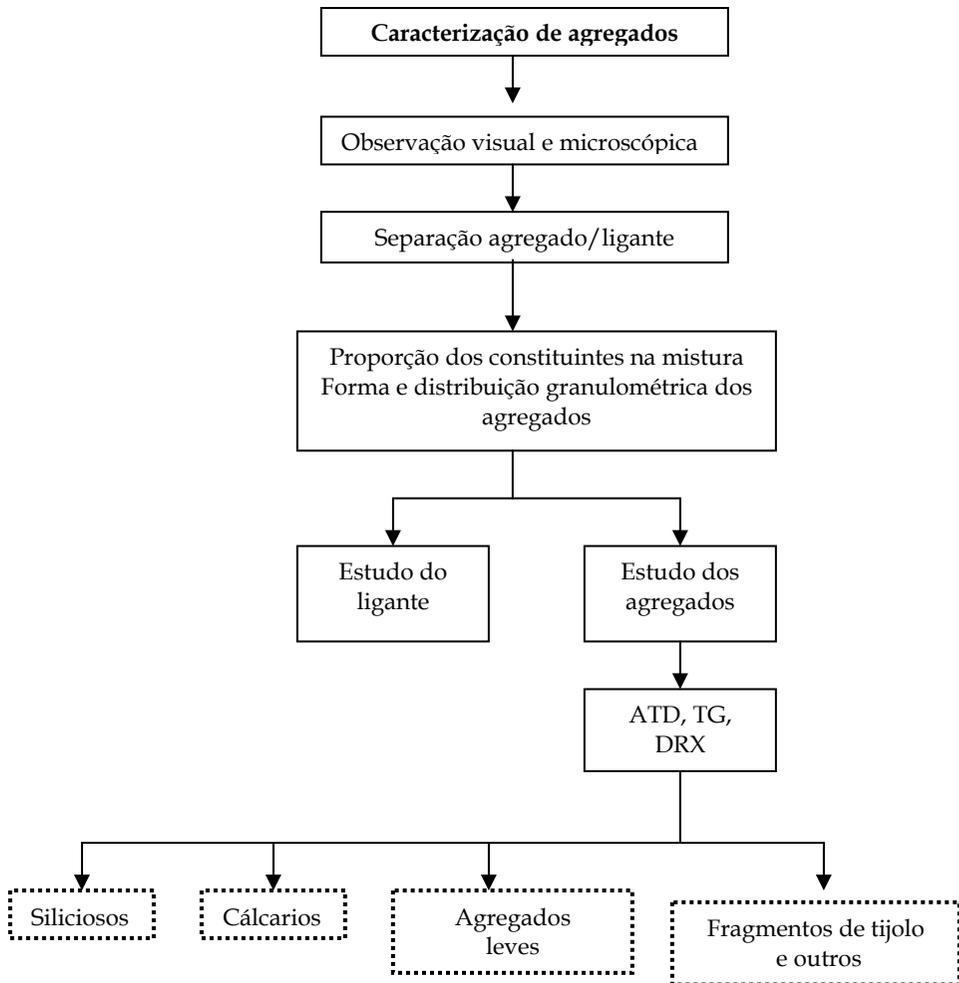


Figura 6.4: Caracterização do tipo de agregados (Marques, 2005)

As argamassas de cal costumam ser digeridas em ácido clorídrico diluído (1:3) para separar os agregados siliciosos. O resíduo insolúvel é depois pesado e passado por um conjunto de peneiros para determinar a granulometria da areia siliciosa (Adriano *et al.*, 2007). Já no que respeita à caracterização dos ligantes, por forma a conseguir distinguir-se os diversos tipos de ligantes (gesso, cal e cimento), a metodologia é mais complexa e os resultados que se obtém padecem sempre de um rigor que não é absoluto, atendendo às inúmeras reacções químicas que podem ter lugar. Marques (2005) recomenda para o efeito a metodologia apresentada na Figura 6.5.

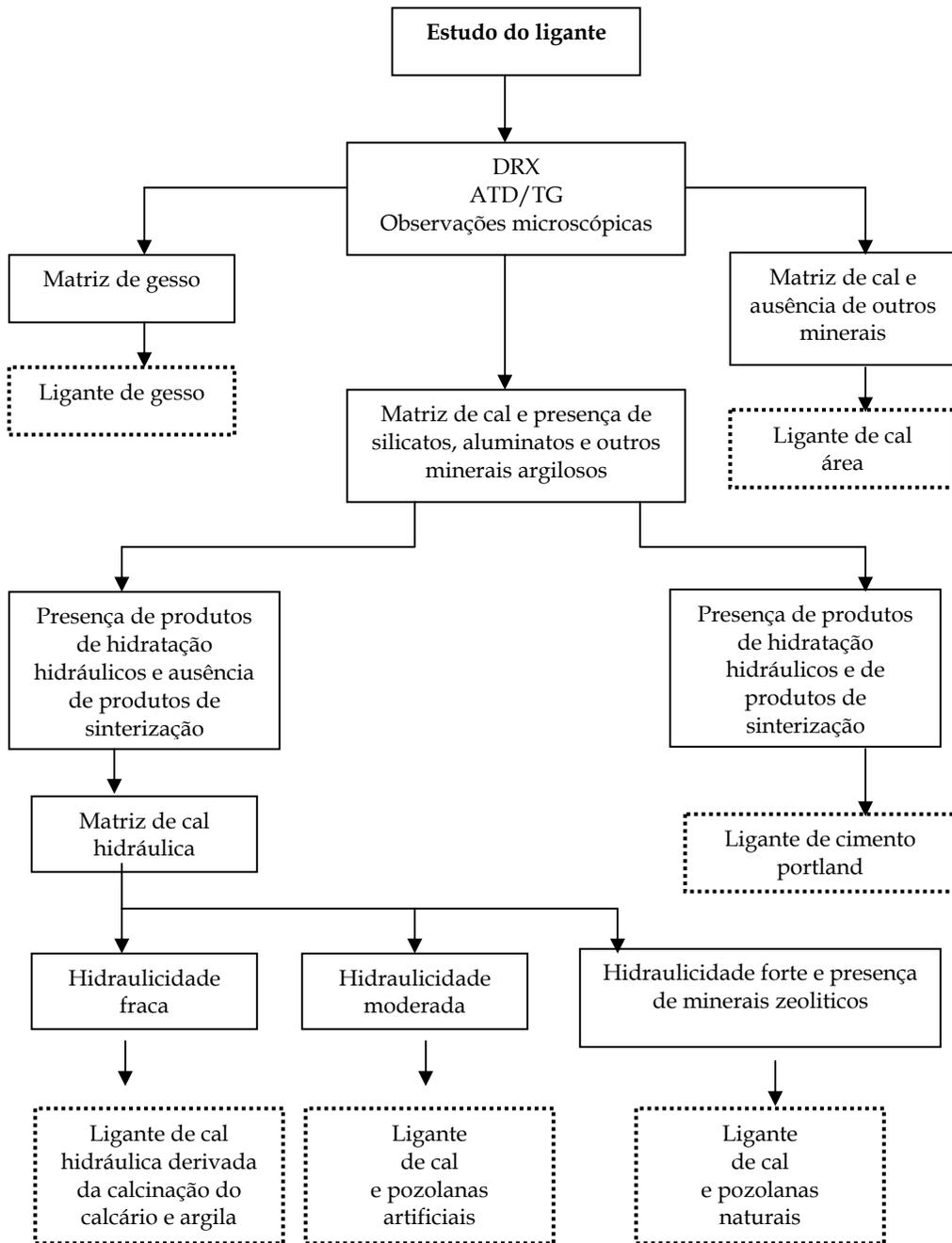


Figura 6.5: Caracterização do tipo de ligantes (Marques, 2005)

A metodologia proposta é obviamente relativa, já que por exemplo, outros autores conseguiram distinguir compostos de gesso de compostos de anidrite com ensaios de FTIR (Carbo *et al.*, 1996). Por outro lado Silva (2003) sugere que a remoção dos agregados facilita a identificação do tipo de

ligante utilizado. Os ligantes de gesso podem também ser identificáveis por ATD/TG, pois que apresentam um pequeno pico no intervalo 120-200° C que corresponde à água fisicamente adsorvida ou através de DRX onde a sua presença pode ser confirmada pela presença de picos de sulfato de cálcio. A hidraulicidade de uma argamassa pode ser obtida através da ATD/TG da perda de massa da água estrutural entre 200 e 600 °C e da perda de massa do dióxido de carbono entre 600-900 °C (Ugurlu e Boke, 2008). Relativamente às argamassas de cal aérea (cal típica), o rácio (CO_2/H_2O_{est}), que expressa o carácter hidráulico das argamassas, é neste caso bastante elevado. Já os ligantes de cal aérea com pozolanas ou de cal hidráulica caracterizam-se por apresentarem rácios (CO_2/H_2O_{est}) inferiores a 10 (Figura 6.6).

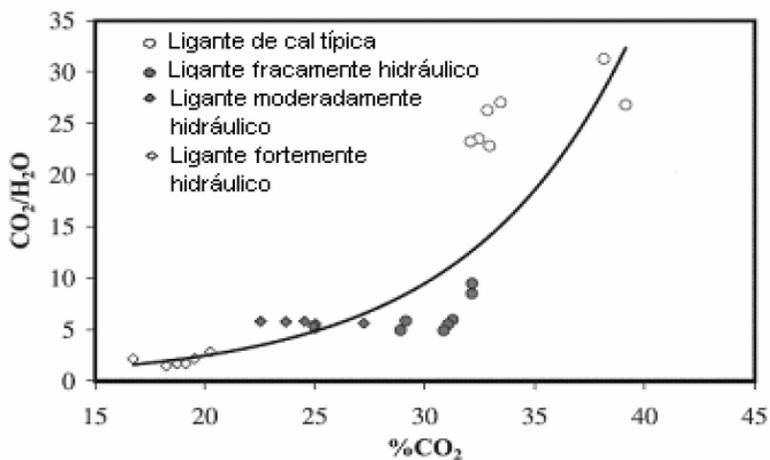


Figura 6.6:
Hidraulicidade de ligantes em função do rácio (CO_2/H_2O_{est}) (Marques, 2005)

Marques *et al.* (2006) referem que rácios (CO_2/H_2O_{est}) inferiores a 3 correspondem a ligantes hidráulicos fortes (pozolanas naturais ou cimento), enquanto que valores daquele rácio entre 3 e 6 correspondem a uma hidraulicidade moderada (cal com pozolanas artificiais como telhas ou tijolos moidos). Estes autores alertam para o facto de esta classificação não ser válida quando se utilizam agregados calcários, porquanto também estes contribuem para a decomposição do dióxido de carbono. A Tabela 6.4 apresenta alguns resultados de caracterização de argamassas antigas (Veiga *et al.*, 2004):

Tabela 6.4: Caracterização de argamassas antigas (Veiga *et al.*, 2004)

<i>Tipo de Construção</i>	<i>Localização</i>	<i>Tipo</i>	<i>Amostras</i>	<i>Areia</i>	<i>Carbonatos</i>	<i>Fracção Solúvel</i>	<i>Traço Ligante : Areia</i>	<i>Resultado</i>
Monumento	Alentejo	Argamassas	Amostra A1Q	57	31	12	1:3	Argamassas de cal aérea e areia de natureza siliciosa
			Amostra A2Q	56	31	11	1:3	
			Amostra A3Q	62	25	13	1:4	
Edifício	Porto	Argamassas	A4	80	9	11	1:16	Argamassas de cal aérea e areia de natureza granítica
			A5	74	14	12	1:9	
Forte	Distrito de Lisboa	Argamassas de Juntas, da Muralha e dum Edifício Interior	Parte superior da muralha	61	13	26	Não foi possível determinar o traço aproximado ¹	Argamassas de cal aérea talvez com adição de gesso e areia de natureza siliciosa
			Parte inferior da muralha	61	4	35		
			Edifício	73	10	17		Argamassa de cal aérea e areia siliciosa
Castelo	Alentejo	Argamassas de Reboco, de Juntas e de Enchimento	Topo interior	68	20	12	1:6	Argamassas de cal aérea e areia predominantemente de natureza siliciosa ²
			Junta do arco	70	20	10	1:6	
			Topo exterior	66	22	12	1:5,5	
			Embasamento	70	12	18	1:10	

Muito embora a caracterização física e química dos agregados e ligantes que constituem as argamassas antigas seja uma etapa fundamental para o seu posterior restauro e/ou consolidação importa ter em conta que esse estudo não permite ter em conta na sua totalidade um parâmetro essencial e que se prende com a cor das argamassas.

Tanto o tipo de ligante como os próprios agregados influenciam a cor final das argamassas, pelo que importa saber não só quais os ligantes (cal aérea ou hidráulica, com ou sem pozolanas, com ou sem gesso) e quais os agregados utilizados (calcários ou graníticos, britados ou de origem fluvial), mas também se os seus substitutos modernos quando misturados resultam num produto final com idêntico cromatismo.

Segundo Veiga *et al.* (2008), pode aferir-se a cor de uma determinada argamassa com recurso a um espectocolorímetro ou ao Atlas cromático Munsell e ao Natural Color System - NCS (Figura 6.7).



Figura 6.7: Identificação de cor de argamassa com recurso ao Atlas NCS (Veiga *et al.*, 2008)

Argamassas de Restauro à Base de Cal

Após a identificação da composição da argamassa de revestimento original, bem assim como as suas propriedades mecânicas e físicas, torna-se necessário projectar as características da argamassa de restauro e proceder à análise da compatibilidade entre as duas. Arioglu e Acun (2006) sugerem para esse efeito a metodologia apresentada na Figura 6.8.

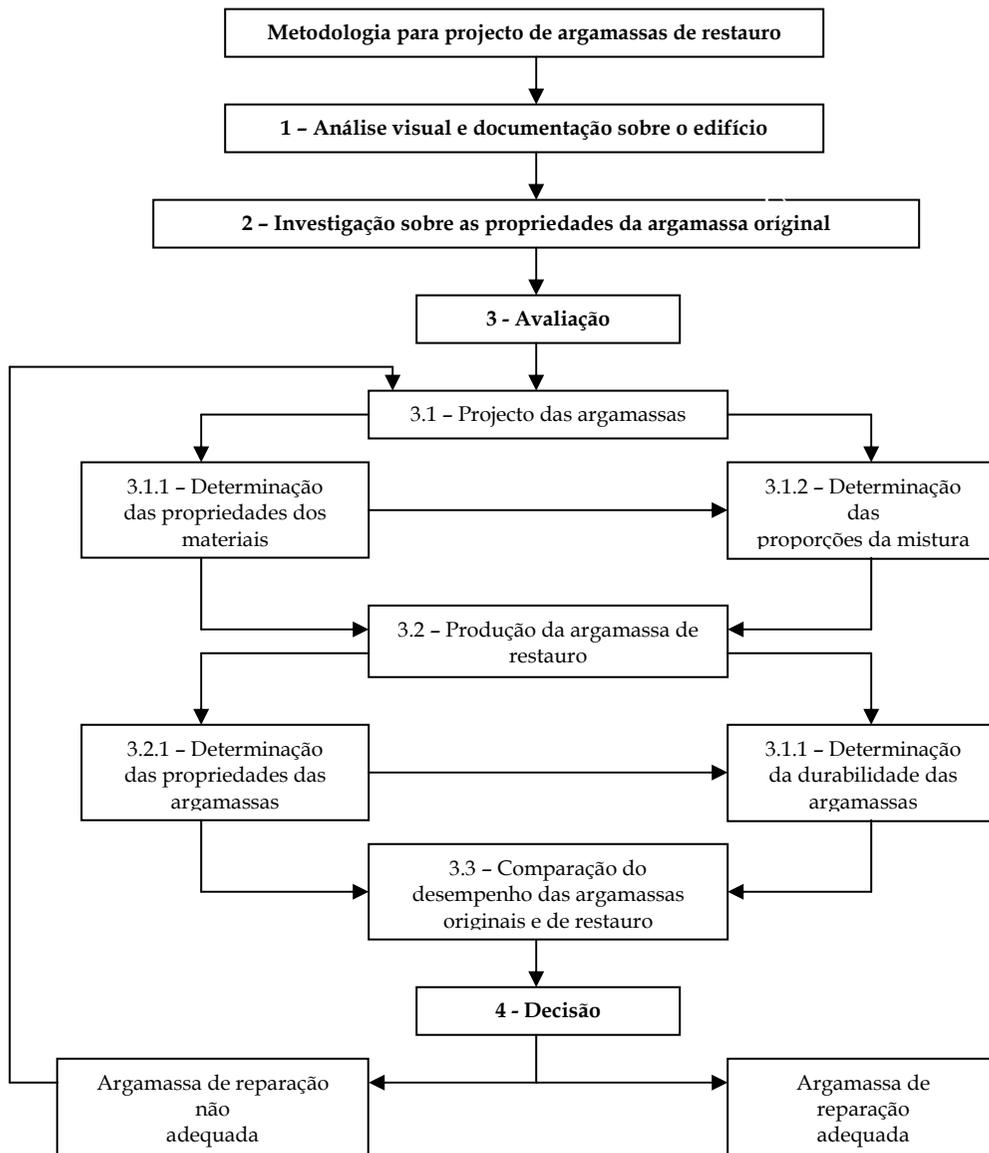


Figura 6.8: Projecto de argamassas de restauro (Arioglu e Acun, 2006)

Viega *et al.* (2004) apresentam uma síntese dos requisitos a satisfazer pelas argamassas de restauro de edificios antigos (Tabela 6.5)

Tabela 6.5: Síntese de requisitos de argamassas de restauro (Viega *et al.*, 2004)

Requisitos	Características das argamassas
	Resistência mecânica suficiente mas moderada
	Módulo de elasticidade reduzido mas não excessivamente baixo
	Aderência suficiente mas moderada
	Forças induzidas reduzidas na argamassa ou no suporte
Não contribuir para degradar elementos pré-existentes	Coefficiente de dilatação térmica semelhante ao das argamassas existentes
Proteger e conservar elementos pré-existentes	Resistência aos sais existentes e baixo teor de sais solúveis
Não descaracterizar o edificio	Absorção de água moderada, alguma resistência à penetração da água, facilidade de secagem
Proteger, conservar e manter a imagem do edificio durante tempo razoável	Estrutura porosa com predominância de pequenos poros
Ser reversível	Resistência a ciclos calor/frio, calor/água e água/degelo
Ser reparável	Aspecto compatível: cor, textura e brilho idênticos às argamassas pré-existentes
	Semelhança de composição e estrutura às argamassas pré-existentes
	Semelhança de comportamento após aplicação em relação às argamassas pré-existentes
	Semelhança da tecnologia de aplicação

Na eventualidade de não ser possível caracterizar as argamassas originais, alguns autores recomendam valores mínimos a respeitar pelas argamassas de restauro (Veiga, 2003) (Tabelas 6.6 e 6.7).

Tabela 6.6: Requisitos mecânicos mínimos para argamassas de revestimentos de edifícios antigos (Veiga, 2003).

Uso	Características Mecânicas (MPa)			Aderência (MPa)	Comportamento à Retracção Restringida			
	Rt	Rc	E		Fr máx (N)	G (N.m)	CSAF	CREF (mm)
Reboco exterior	0,2-0,7	0,4-2,5	2000-5000	0,1-0,3	< 70	>40	>1,5	>0,7
Reboco interior	0,2-0,7	0,4-2,5	2000-5000					
Juntas	0,4-0,8	0,6-3	3000-6000	0,1-0,5				

Rt - Resistência à tracção; Rc - Resistência à compressão; E - módulo de elasticidade; Fr - força máxima induzida pela retracção restringida; G - energia de rotura à tracção; CSAF - coeficiente de segurança à abertura da 1ª fenda; CREF - Coeficiente de resistência à evolução da fendilhação: $CREF=G/Fr$

Tabela 6.7: Requisitos de comportamento à água para argamassas de revestimentos de edifícios antigos (Veiga, 2003)

Uso	Comportamento à água				
	Ensaio clássico		Ensaio com humidímetro		
	S_D (m)	C(kg/m ² .h ^{0.5}) (kg/m ² .min ^{0.5})	M (h)	S (h)	H (m.v.h)
Reboco exterior	< 0,08	< 12; > 8 < 1,5; > 1	> 0,1		< 16000
Reboco interior	< 0,1	-	-	< 120	-
Juntas	< 0,1	< 12; > 8 < 1,5; > 1	> 0,1		< 16000

S_D - espessura da camada de ar de difusão; C-coeficiente de capilaridade; M-atraso na molhagem; S-período de humedecimento; H-intensidade da molhagem

Cal com Incorporação de Gorduras

Em termos históricos o uso de argamassas de cal com azeite para obter um produto de características hidrófugas remonta ao tempo de Vitruvius. O Arquitecto português Quirino da Fonseca publicou na década de 90, um pequeno opúsculo onde faz referência à adição de pequenas quantidades de óleo durante a fase de hidratação da cal, material que teria sido utilizado no

fabrico de argamassas pelos portugueses, inclusive na fortaleza de Ormuz em Goa no séc. XVI (Sá, 2005) (Figura 6.9).

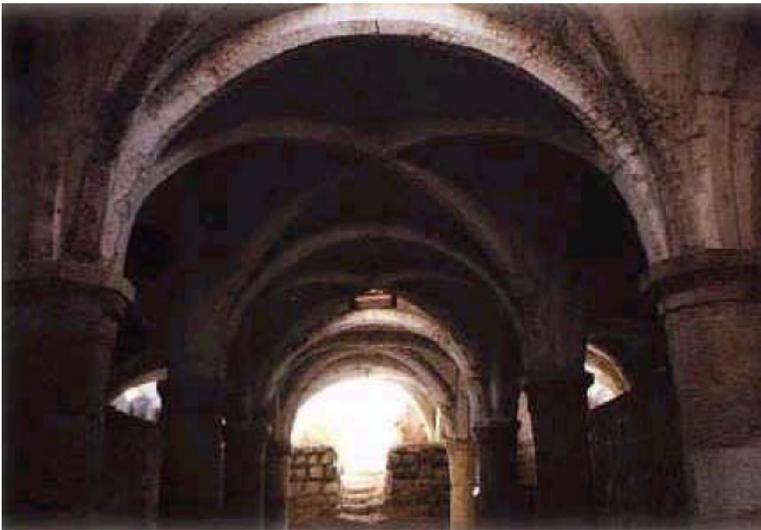


Figura 6.9: Ruínas da cisterna da fortaleza de Ormuz (Sá, 2005)

Sá (2005) refere também que já no livro “O Engenheiro Português” (já referido no capítulo 5), é patente a utilização de azeite no fabrico da cal, como se expõe na seguinte transcrição:

“...se mandarà descarregar a cal, antes de ser traçada, deitando-se enquanto ferve alguns golpes de azeite, ou borras do mesmo, e com esta cal feita, como para cair se fará o traço com os três quintos de area e dous quintos de cal...”

Desde o meio da década de 90 que é comercializada em Portugal uma cal com a designação de “cal D.Fradique”, que é produzida com incorporação de borra de azeite (oleína). Esta cal terá surgido (segundo se pensa) devido a diligências do Arquitecto Quirino da Fonseca, que tinha sido incumbido de seleccionar um ligante para as argamassas a utilizar nas obras de reabilitação das muralhas do Castelo de São Jorge, em Lisboa. (Sá, 2002). O endurecimento da cal D. Fradique ocorre por carbonatação à semelhança das outras cais aéreas. As argamassas fabricadas com cal D.Fradique apresentam relativamente às argamassas fabricadas com cal aérea corrente as seguinte vantagens (Sá, 2002):

- Maior leveza;
- Maior consistência;
- Maior permeabilidade ao vapor de água;
- Capilaridade muito inferior;
- Impermeabilização (medida com humidímetro) muito superior;
- Maior resistência ao desenvolvimento de fungos.

Contudo Veiga (2003) refere que a utilização indiscriminada de revestimentos à base de cal hidratada com gordura tem a par de alguns sucessos conduzido também a maus resultados (Figura 6.10).



Figura 6.10: Argamassa recente de cal apagada com gordura: perda de coesão e erosão (Veiga, 2003)

Sá (2005) estudou o comportamento de rebocos contendo cal D.Fradique no revestimento de paredes de pedra e cal, tendo observado que embora os rebocos à base de cal com gorduras tenham uma elevada capacidade de impermeabilização, apresentam por outro lado baixa resistência superficial e uma menor resistência ao arrancamento que os restantes rebocos.

Cal com Pozolanas

Uma pozolana é definida como um material silicioso ou de aluminato silicioso que não possui propriedade cimentícia, mas que na presença de humidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, para formar produtos que possuem propriedades cimentícias. A reactividade pozolânica,

isto é a capacidade de o material se combinar com o hidróxido de cálcio é uma propriedade bastante complexa e que está dependente da sílica e alumina não se apresentarem num elevado grau de cristalinidade. Em termos químicos torna-se necessário que a percentagem conjunta de sílica, alumina e óxido de ferro seja superior a 70%. Alguns autores comprovam mesmo que a reactividade é tanto maior quanto maior esta percentagem conjunta (Al-Rawas e Hago, 2006).

As pozolanas podem ser naturais, artificiais ou obtidas a partir de subprodutos industriais. As pozolanas naturais são provenientes de magmas geralmente ácidos (ricos em sílica) que solidificaram rapidamente e ficaram no estado amorfo ou cripto-cristalino. Já as pozolanas artificiais (argilas de qualquer tipo depois de sujeitas a temperaturas suficientes para a sua desidroxilação), mas inferiores ao início de recristalização (Al-Rawas *et al.*, 1998), são obtidas pela criação de uma instabilidade interna à custa da saída de iões OH⁻ da rede cristalina dos minerais argilosos.

Por volta de 1930, foi descoberto que também as cinzas volantes gozavam de propriedades pozolânicas, ou seja, demonstravam capacidade para reagir com a cal e proporcionar a formação de material cimentício. A cinza volante é o principal produto sólido da combustão do carvão pulverizado em centrais eléctricas que usam carvão. É constituída por partículas principalmente vítreas e esféricas, de sílica, alumina e óxido de ferro. Este tipo de cinza constitui 80% a 90% do subproduto sólido proveniente das fábricas de carvão e é incorporado ao longo do percurso dos gases das condutas por precipitadores electrostáticos ou por meios mecânicos. Desde então a sua utilização em diversas situações aumentou a sua produção e excedeu o seu uso em grande escala (Jalali, 1991).

De um modo geral os aluminosilicatos reactivos da pozolana vão reagir com o hidróxido de cálcio, formando silicatos e aluminatos de cálcio. Os principais compostos observados são os seguintes:

Silicoaluminato bicálcico hidratado ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)

Silicatos de cálcio hidratados (CSH)

Aluminatos de cálcio hidratados

A utilização de argamassas á base de cal e pozolanas é uma tradição com milhares de anos, tendo surgido por acaso, quando acidentalmente se constatou o bom desempenho mecânico de argamassas de cal com adição de cinzas vulcânicas. Mais tarde ter-se há constatado igualmente que se obtinha idêntico desempenho em argamassas de cal às quais se adicionavam fragmentos cerâmicos moídos (telhas ou tijolos). O aparecimento do cimento portland veio contudo ditar um fim no uso de argamassas de cal com pozolanas, porquanto aquelas não apresentavam um desempenho mecânico tão elevado.

Contudo e à medida que a reabilitação dos edifícios antigos tem vindo nas últimas décadas a ganhar importância crescente, com a consequente retoma do uso de argamassas de cal em substituição do cimento portland, também o uso de pozolanas tem vindo a ressurgir como forma de ultrapassar o elevado tempo de endurecimento daquelas, sem os inconvenientes normalmente associados ao cimento portland, como seja um elevado módulo de elasticidade, baixa permeabilidade ao vapor de água e fundamentalmente a introdução de sais solúveis. A utilização de pozolanas em argamassas de cal ganha ainda um novo interesse numa época em que a sustentabilidade da indústria da construção é a palavra de ordem, sendo que podem assim ser reutilizados grandes quantidades de sub-produtos e resíduos industriais. É assim natural que nos últimos tempos a comunidade científica tenha por isso voltado a sua atenção para as argamassas de cal com pozolanas.

Rodrigues e Henriques (2002), referem o aumento da resistência das argamassas de cal aérea quando aditivadas com pozolanas como o caulino tratado termicamente, sendo que esse comportamento é acompanhado de

um aumento da resistência aos cloretos e aos sulfatos. Para trabalhos de reabilitação de edifícios antigos, Rodrigues e Henriques (2004) recomendam a utilização de argamassas de cal aérea aditivadas com pó de tijolo em zonas onde seja expectável um elevado nível de cloretos.

Velosa (2006) estudou a influência das argamassas de cal com vários tipos de pozolanas artificiais (pó de tijolo, metacaulino, sílica de fumo) e naturais provenientes dos Açores e também de Cabo Verde, na reabilitação de edifícios antigos. Os resultados obtidos por esta autora confirmam a compatibilidade das argamassas com suportes antigos de alvenaria de pedra, também o facto de serem permeáveis ao vapor de água, apresentarem uma secagem rápida e terem baixa susceptibilidade à fendilhação. As referidas argamassas revelaram também possuir um bom desempenho em termos de durabilidade caracterizada nos ensaios de envelhecimento acelerado e de resistência aos sais solúveis.

Almeidas *et al.* (2007) concluem que a utilização cinzas de casca de arroz como pozolana em argamassas de cal aérea leva a um aumento da resistência daquelas argamassas aos sais solúveis (sulfatos e cloretos).

Magalhães *et al.* (2007) revelam a opção pela argamassa de cal aérea com metacaulino em trabalhos de reabilitação do Forte de S.João em Lisboa, pelo facto de essa solução evidenciar um bom compromisso em termos cromáticos e de desempenho (Figura 6.11).



Figura 6. 11: Forte de S.João (Magalhães et al., 2007)

Aplicação das Argamassas

Tão ou mais importante que a questão dos materiais é a forma como é feita a mistura e aplicação posterior da argamassa (Teutónico *et al.*, 1994). Pelo que se uma correcta operação de restauro requer o uso de materiais adequados, também requer um bom pedreiro para que esse restauro seja executado em boas condições (Margalha, 2007). Estudos recentes sistematizam alguns cuidados a ter na execução de revestimentos de edifícios antigos com argamassas de cal (Cavaco, 2005):

- Limpar o suporte de impurezas e realizar encasques de enchimentos onde existam depressões;
- Utilizar o mínimo de água garantindo um mínimo de consistência para aplicação da argamassa;
- Complementar a amassadura em betoneira com amassadura manual ou com berbequim;
- Projecção da argamassa com força a que segue compressão com a colher;
- Aplicar a argamassa em várias camadas finas, deixando entre as aplicações tempo para a carbonatação da camada anterior (pelo menos uma semana);

- Proteger o revestimento da exposição solar para evitar uma secagem demasiado rápida. Deve também proteger-se da acção da água para não inibir a carbonatação.

No caso de se utilizarem argamassas de cal com pozolanas, será necessário adaptar as referidas recomendações, principalmente no que se refere ao facto de ser necessário manter o revestimento húmido nos primeiros dias para facilitar a reacção pozolânica (Veiga, 2006).

Atendendo à importância da consistência da argamassa na aplicação e bom desempenho desta, Cavaco (2005) faz referência a um método empírico para confirmar se a consistência das argamassas de cal é ou não excessivamente plástica. O método passa pela realização de uma bola de argamassa com 8 cm de diâmetro que é colocada numa superfície plana. Se sofrer uma deformação superior a 4 ou 5mm, a argamassa embora tenha uma consistência plástica terá água em excesso, já se a deformação não exceder o limite referido isso significa que a argamassa terá uma consistência seca que é a mais recomendável (Figura 6.12).



Figura 6.12: Bola de argamassa de consistência seca (Cavaco, 2005)

A questão da aplicação está directamente ligada ao desempenho das argamassas em condições reais, as quais só podem aferir-se através de ensaios realizados “*in situ*” quanto mais não seja porque a natureza do suporte influencia de forma decisiva o desempenho das argamassas (Henriques e Rodrigues, 2008). É assim indispensável (quando possível) a

avaliação das propriedades das argamassas após a sua aplicação em painéis experimentais (Figura 6.13).



Figura 6.13: Realização de painéis experimentais para avaliar o comportamento das argamassas de revestimento em suportes de alvenaria de tijolo maciço (em cima) ou em suportes finais de alvenaria de pedra (Veiga, 2003)

7

Referências

- ALMEIDA, N.G.; RODRIGUES, P.F; PINTO, A.P. (2007) *Argamassas em Base em Cal Aérea e Cinzas de Casca de Arroz para Conservação do Património Construído*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.
- AIREY, G.D.; COLLOP, A.C.; ZOOROB, S.E.; ELLIOT, R.C. (2008) *The Influence of Aggregate, Filler and Bitumen on Asphalt Mixture Moisture Damage*. Construction and Building Materials, Vol 22, pp. 2015-2024.
- ADRIANO, P.; SILVA, A.S.; VEIGA, R.; CANDEIAS, A.; MIRÃO, J. (2007) *Determinação da Composição de Argamassas Antigas*. 2º Congresso Nacional de Argamassas, Lisboa.
- AL-RAWAS, A. A.; HAGO, A. W.; CORCORAN; T.C. (1998) *Properties of Omani artificial pozzolana*. Applied Clay Science Vol.13, pp.275-292.
- ALEXANDRA, S. S. S. (2006) *Arquitetura e Construção em Terra no Piauí: Investigação, Caracterização e Análise*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Piauí.
- ALVAREZ, J.; SEQUEIRA, C.; COSTA, M. (2005) *Ensinamentos a retirar do passado histórico das argamassas*. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa
- ALVAREZ, J.A.S. (2007) *Alvenarias e argamassas anteriores ao Império Romano*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa
- AGOSTINHO, C.S.A. (2008) *Estudo da Evolução do Desempenho no Tempo de Argamassas de Cal Aérea*. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, IST.
- AGUIAR, B. (2007). *Materiais de construção I*, Apontamentos, Universidade do Minho
- ARIOGLU, N.; ACUN, S. (2006) *A research about a method for restoration of traditional lime mortars and plasters: A staging system approach*. Building and Environment Vol. 41, pp.1223-1230.
- BAUER, L. A. F.(1987) *Materiais de Construção 1*. Livros Técnicos e Científicos Editora, 3ª Edição, Rio de Janeiro - Brasil.
- BOYNTON, R. (1980) *Chemistry and technology of lime and limestone*. John Wiley and Sons.

CARBO, M.; REIG, F.; ADELANTADO, J.; MARTINEZ, V. (1996) *Fourier transformed infrared spectroscopy and the analytical study of works of art for purposes of diagnosis and conservation*. Analytica Chimica Acta Vol. 330, pp.207-215.

CARTMELL, H.S.; BERG, A.O. (1958) *Lime Stabilization of Soils for Use as Road Construction of Low-Cost Roads in N. Rhodesia*. N. Rhodesia, Road Research Overseas Bull, N.º 9.

CASTRO, E.; SERAFIM, L.A. (1974) *O Solo-Cal na pavimentação de estradas e aérodromos*; Memória N.º 450. Ministério do Equipamento Social e do Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

CAVACO, L.S.R. (2005) *Técnicas de Aplicação de Argamassas de Revestimento em Edifícios Antigos*. Influência do Desempenho. Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico.

COWAN, H. (1977) *The Master Builders: a history of structural and environmental design from ancient Egypt to the Ninetennth Century*. John Wiley and Sons, New York

CORRÊA, A.A.R; TEIXEIRA, V.H; LOPES, S.P. (2005) *Avaliação das Propriedades Físicas e Mecânicas do Adobe*. Lavras, Vol. 30, pp. 503 – 515.

COUTINHO, J.S (2006) *Materiais de Construção 2. Ligantes e caldas*. Departamento de engenharia civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

CRISTELO, N.M.C. (2001) *Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas, Geotecnia e Fundações. Universidade do Minho.

CRISTELO, N.M.C.; JALALI, S. (2008) *Estabilização de solos com cal*. Edição TecMinho. ISBN: 978-989-95961-1-5, Guimarães.

CROSS, S. (1999) *Experimental Cold in-place Recycling with Hydrated Lime*. In 78th Annual Meetinh of TRB

ELSEN, J. (2006) *Microscopy of historic mortars – A review*. Cement and Concrete Research, Vol. 36, pp. 1416-1424

EN 1015-3: (1999) *Methods of test for mortar masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*.

GENESTAR, C.; PONS, C. (2003) *Ancient plaster mortars from several convents and Islamic and Gothic places in Palma de Mallorca (Spain). Analytical characterization*. Journal of Cultural Heritage Vol. 4, pp. 291-298

GONÇALVES, T.; VEIGA, M.R. (1994) *Aplicação de um Aparelho Detector de Humidade ao estudo da Capacidade de Impermeabilização de Argamassas de Reboco*. Relatório 98/94-NCCT, LNEC.

GREEN, K.M.; CARTER, M.; HOFF, W.; WILSON, M. (1999) *The effects of lime and admixtures on the water-retaining properties of cement mortars*. Cement and Concrete Research Vol. 29, pp. 1743-1747.

GUERREIRO, V.M. (2002) *Paredes de Alvenaria em Betão Celular Auto-Clavado*. Monografia Nº 8, Construlink.

GUERREIRO, C.; HENRIQUES, F.M.A.; Pinto, A.P. (2007) *Análise Comparativa de Argamassas de Cal Aérea, Medianamente Hidráulicas e de Ligantes Mistos para Rebocos de Edifícios Antigos*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa

GUIMARÃES, J. E. P. (2002) *A cal – fundamentos e aplicações na engenharia civil*. 2ª Edição, São Paulo, Pini.

HANLEY, R.; PAVIA, S.(2008) *A study of the workability of natural hydraulic lime mortars and its influence on strength*. Materials and Structures Vol. 41, pp. 373-381.

HENRIQUES, F. (2003) *A conservação do património: Teoria e prática*. 3º Encore, LNEC.

HENRIQUES, F. (2003a) *The concept of acceptable technology in architectural conservation*. ITAM-ARCCHIP-ARIADNE Workshop 12, República Checa.

HENRIQUES, F.; RODRIGUES, P. (2008) *O papel da investigação das argamassas de substituição na conservação do património*. Universidade do Minho, Revista Engenharia Civil, N° 31, pp.29-37.

JALALI, SAÍD. (1991) *A Study of factors affecting the mechanical behaviour of lime-fly ash mixtures*. A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of the council for national academic awards for the degree of Ph. D., Coventry Polytechnic.

JALALI, S. (2007) *Blocos de Terra Comprimidos de Elevado Desempenho Utilizando Misturas Metacaulino-Cal*. V Seminário de Arquitectura de Terra em Portugal, pp.89-90.

JALILI, M.; NIAZI, Y. (2008) *Effect of portland Cement and Lime Additives on Properties of Cold in-Place Recycled Mixtures with Asphalt Emulsion*. Construction and Building Materials, Vol., pp.

JOHANNESON, B.; UTGENANNT, P. (2001) *Microstructural Changes caused by Carbonation of Cement Mortar*. Cement and Concrete Research Vol. 31, pp. 925-931.

KOK, B.V.; YILMAZ, M. (2008) *The effects of Using Lime and Styrene-butadiene-styrene on moisture sensivity Resistance of Hot Mix Asphalt*. Construction and Building Materials, Vol., pp.

LAWRENCE, R.; MAYS, T.; RIGBY, S.; WALKER, P.; D'AYALA, D. (2007) *Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars*. Cement and Concrete Research Vol. 37, pp. 1059-1069.

LUÍS, A. S. (1972) *Estabilização com Cal – Breve referência ao seu emprego em Moçambique*. Colóquio realizado no LNEC.

LOPES, M. L. (2001) *A caiação Tradicional no Distrito de Santarém*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Évora.

MAGALHÃES, A.C.; VEIGA, M.R.; VELOSA, A.L. (2007) *Caracterização e Avaliação do Desempenho de Possíveis Soluções de Argamassas para Revestimentos de Paredes de Edifícios Antigos*. 2º Congresso Nacional de Argamassas, Lisboa.

MARGALHA, M.G; VEIGA, M.R.; BRITO, J. (2006) *The Maturation Time Factor on the Lime Putty Quality*. 7th International Brick Masonry Conference.

MARGALHA, M.G. (2008) *Conservação e recuperação de construções em taipa. Acção de formação*. Taliscas, Odemira.

MARQUES, S. (2005) *Estudo de argamassas de reabilitação de edifícios antigos*. Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro.

MARQUES, S.; RIBEIRO, R.; SILVA, L.; FERREIRA, V.; LABRINCHA, J. (2006) *Study of Rehabilitation Mortars: Construction of a Knowledge Correlation Matrix*. Cement and Concrete Research Vol. 36, pp.1894-1902.

MATEUS, R.F.M. (2004) *Novas Tecnologias Construtivas com Vista à Sustentabilidade Construção*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho.

MILLER, M. (1999) *Lime*. U.S Geological Survey Minerals Yearbook.

MILLOGO, Y.; HAJAJI, M.; OUEDRAGO, R. (2008) *Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks*. Construction and Building Materials Vol. 22, pp. 2386 – 2392.

MIRA, P.; PAPADAKIS, V.G.; TSIMAS, S. (2002) *Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete*. Cement and Concrete Research Vol.32, pp. 683 – 689.

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

NP EN 459-1: (2002) *Cal para construção – Parte 2: Métodos de ensaio*.

ORÚS, F.(1977) *Materiales de Construcción*. Editorial Dossat, S.A., Madrid, 7^a Edição, Reimpresión.

PAVIA, S.; TREACY, E. (2006) *A comparative study of the durability and behaviour of fat lime and feebly-hydraulic lime mortars*. Materials and Structures Vol. 39, pp. 391-398.

PAIVA, S.C.; GOMES, E.A.; OLIVEIRA, R.A. (2007) *Controle de Qualidade da Cal para Argamassas – Metodologias Alternativas*. Revista Ciência & Tecnologia. Ano 1, nº 1, pp.1-11.

PAULO, R. S. (2006) *Caracterização de Argamassas Industriais*. Tese de Mestrado Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro.

PINHO, F.F.S. (2001) *Paredes de Edifícios Antigos em Portugal*. Edição LNEC, Conservação e Reabilitação.

RAGO, F.; CINCOTTO, M.A. (1999) *Influência do tipo de cal hidratada na reologia das pastas*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de S. Paulo, ISSN 0103 – 9830.

RATO, V.N.P.M. (2006) *Influência da Microestrutura Morfológica no Comportamento de Argamassas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FCT/UNL.

RIBEIRO, L.C.; LOPES, R.P.N. (2007) *As argamassas na antiguidade Greco-Romana: usos, definições e traduções*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa

RODRIGUES, P.F.; HENRIQUES, F.M.A. (2002) *The Effects of Hydraulic Components on Lime Mortars*. XXX IAHS World Congress on Housing, Coimbra, Portugal

RODRIGUES, M.P. (2004) *Argamassas de Revestimentos para Alvenarias Antigas. Contribuição para o Estudo da Influência dos Ligantes*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FCT/UNL.

RODRIGUES, P.F.; HENRIQUES, F.M.A. (2004) *Current Mortars in Conservation: An Overview*. International Journal for Restoration, Vol.10, pp.692-622.

RODRIGUES, P.F. & HENRIQUES, F.M.A. (2003) *Avaliação comparativa de Cais Aéreas Correntes*. 3º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios: Materiais e Técnicas de Conservação e Reabilitação, LNEC, pp. 503-510.

RODRIGUES, P.F.; HENRIQUES, F.M.A.; RATO, V.M. (2007) *Argamassas Correntes: Influência do Tipo de Ligante e do Agregado*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.

SANTIAGO, C.C. (2000) *Estudo dos Materiais de Construção de Vitruvius até ao Séc.XVIII, uma Visão Crítico Interpretativa à Luz da Ciência Contemporânea*. Tese de Doutoramento em Conservação do Património Arquitectónico, Universidade de Évora.

SANTOS, J.C.P. (1985) *Viabilidade técnica da produção de blocos silico-calcários*. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SÁ, A.F.G. (2002) *Argamassa de cal aérea hidratada com incorporação de gordura e sua utilização em rebocos*. Monografia N° 7, Construlink.

SÁ, A.F.G. (2005) *Rebocos em Paredes de Pedra e Cal*. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, IST.

SEABRA, M.; LABRINCHA, J.; FERREIRA, V. (2007) *Rheological Behaviour of Hydraulic Lime-Based Mortars*. Journal of the European Ceramic Society Vol. 27, pp. 1735 – 1741.

SEABRA, M.P.; PAIVA, H.; LABRINCHA, J.A.; FERREIRA, V.M. (2009) *Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars*. Construction and Building Materials Vol. 23, pp. 1147 – 1153.

SEQUEIRA, A.C.; FRADE, D.; GONÇALVES, P. (2007) *Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa.

SILVA, S. (2003) *New approach in old mortars characterization*. Proceedings 3rd Encore LNEC, pp. 917-926.

SILVA, N. G.(2006) *Argamassa de Revestimento de Cimento, Cal e Areia Britada de Rocha Calcária*. Tese de Mestrado, UFPR. Sector de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SHUI, C.; GONG, L.; WANG, H. (1986) *Concrete Made with Calcium Enriched Fly Ash*. Proceedings of the 2nd International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-91, pp. 387-411

SHUKLA, A.; TIWARI, G.N.; SODHA, M.S. (2008) *Embodied energy analysis of adobe house*. Renewable Energy Vol., pp. 1-7.

TEUTONICO, J.M.; NACCAIG, I.; BURNS, C.; ASHURST, J. (1994) *The Smeaton Project: Factors Affecting the Properties of Lime-Based Mortars*. Bulletin of the Association for Preservation Technology, Vol.25, pp.32-49.

UGURLU, E.; BOKE, H. (2008) *The use of Brick-Lime Plasters and Their Relevance to Climatic Conditions of Historic Bath Buildings*. Construction and Building Materials, Vol. , pp. .

VEIGA, R. (1998) *Comportamento de Argamassas de Revestimento de Paredes-Contribuição do Estudo para a sua Resistência à Fendilhação*. Tese de Doutoramento, LNEC.

VEIGA, M.R.; TAVARES, M. (2002) *Características das Paredes Antigas. Requisitos dos Revestimentos por Pintura*. Actas do Encontro A Indústria das Tintas no início do Século XXI. Lisboa, APTETI.

VEIGA, R. (2003) *As Argamassas na Conservação*. In Actas das 1ª as Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Avaliação e Reabilitação das Construções Existentes. Coleção Comunicações, COM 103, LNEC.

VEIGA, M.; AGUIAR, J.; SILVA, A.; CARVALHO, F.(2004) *Conservação e renovação de revestimentos de edificios antigos*. LNEC.

VEIGA, M.R.; SOUZA, R.H. (2004) *Metodologia de Avaliação da Retracção Livre das Argamassas desde a sua Moldagem*. Revista Engenharia Civil.UM, nº 20, pp.45-56.

VEIGA, R. (2006) *Arquitectura Ibérica. Os Revestimentos Antigos e a Identidade dos Edifícios*. Arquitectura Ibérica, Reabilitação nº 12, pp.16

VEIGA, M.; VELOSA, A.; TAVARES, M. (2008) *A Cor das Argamassas*. Revista Construção Magazine, nº25.

VELOSA, A.L.PL. (2006) *Argamassas de Cal com Pozolanas para Revestimento de Paredes Antigas*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.

WESTERHOLM, M.; LAGERBLAD, B.; SILWEBRAND, J.; FORSSBERG, E. (2008) *Influence of Fine Aggregate Characteristics on the Rheological Properties of Mortars*. *Cement and Concrete Composites* Vol. 30, pp. 274-282.

ZACHAROPOULOU, G. (1998) *The renaissance of lime based mortar technology. An appraisal of a bibliographical study*. Materials for protection of European Cultural Heritage, Athens.

8

Índice de Figuras

Capítulo 1:

Figura 1.1: Pirâmides de Quéops e Quéfren	10
Figura 1.2: Vista actual do arquipélago de Santorini	12
Figura 1.3: Grande muralha da China	13
Figura 1.4: Via Ápia	14
Figura 1.5: Pont du Gard	15
Figura 1.6: Coliseu de Roma	15
Figura 1.7: Panteão de Roma e vista do seu interior	15
Figura 1.8: Tipos de cal de construção	17

Capítulo 2:

Figura 2.1: Sequência do fabrico da cal	23
Figura 2.2: Extracção de pedra calcária para fabrico da cal	25
Figura 2.3: Forno de campanha para cal	26
Figura 2.4: Forno intermitente	27
Figura 2.5: Forno contínuo vertical a carvão	28
Figura 2.6: Forno contínuo vertical a carvão	29
Figura 2.7: Influência da temperatura de calcinação	29

Capítulo 4:

Figura 4.1: Cura de betão celular em auto-clave	49
Figura 4.2: Construção com betão celular autoclavado	50
Figura 4.3: Caiação tradicional	52
Figura 4.4: Formação de material cimentício numa mistura solo-cal	54
Figura 4.5: Estabilização de solo com cal	58
Figura 4.6: Edificações em terra	59
Figura 4.7: Alvenaria de adobe sobre fundação de pedra no Alentejo	61
Figura 4.8: Blocos de adobe em fase de cura	62
Figura 4.9: Edifício com paredes em blocos de adobe construído no Algarve	62
Figura 4.10: Microestrutura de blocos de adobe com cal	63

Figura 4.11: Em cima construção de alvenarias com recurso a BTC-Alentejo; em baixo várias unidades de BTC	64
Figura 4.12: Execução de BTC com a prensa Cinva-ram	65
Figura 4.13: BTC com encaixes tipo macho/femêa	65
Figura 4.14: Execução de camada de revestimento betuminoso	67
Capítulo 5:	
Figura 5.1: Microestrutura de duas argamassas de cal aérea	70
Figura 5.2: Microestrutura de uma argamassa de cal hidráulica com diferentes idades de cura e curadas em câmara e ao ar	71
Figura 5.3: Dispositivo para ensaio de espalhamento	72
Figura 5.4: Reómetro e pormenor da haste rotativa	74
Figura 5.5: Ensaio de retracção com calha metálica	77
Figura 5.6: Ensaio de retracção restringida	78
Figura 5.7: Comportamento mecânico de argamassas com vários tipos de ligantes	79
Figura 5.8: Ductilidade de argamassas	82
Figura 5.9: Equipamento para medição do módulo de elasticidade dinâmico	82
Figura 5.10: Capilaridade versus porosidade aberta	86
Figura 5.11: Ensaio de argamassas com o humidímetro	87
Figura 5.12: Perda de massa de argamassas de cal sujeitas a ciclos de exposição em solução com sulfato de sódio	88
Figura 5.13: Perda de massa de argamassas de cal sujeitas a ciclos de exposição em solução com cloretos	89
Capítulo 6:	
Figura 6. 1: Metodologia de caracterização de argamassas antigas seguida no LNEC	96
Figura 6. 2: Caracterização das propriedades de um fragmento de argamassa	97

Figura 6. 3: Ensaaios de caracterização de argamassas “ <i>in situ</i> ”	99
Figura 6. 4: Caracterização do tipo de agregados	101
Figura 6.5: Caracterização do tipo de ligantes	102
Figura 6.6: Hidraulicidade de ligantes em função do rácio ($\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{est}}$)	103
Figura 6.7: Identificação de cor de argamassa com recurso ao Atlas NCS	105
Figura 6.8: Projecto de argamassas de restauro	106
Figura 6.9: Ruínas da cisterna da fortaleza de Ormuz	109
Figura 6.10: Argamassa recente de cal apagada com gordura	110
Figura 6.11: Forte de S.João	114
Figura 6.12: Bola de argamassa de consistência seca	115
Figura 6.13: Realização de painéis experimentais para avaliar o comportamento das argamassas de revestimento em suportes de alvenaria de tijolo maciço (em cima) ou em suportes finais de alvenaria de pedra	116

9

Índice de Tabelas

Capítulo 1:

Tabela 1.1: Classificação de calcários de acordo com o teor de carbonato de cálcio 19

Tabela 1.2: Tipos de cal utilizadas na construção de acordo com a hidráulica 20

Capítulo 2:

Tabela 2.1: Exemplo de etiqueta com Marcação CE 36

Tabela 2.2: Frequência de amostragem e ensaio para centros de distribuição 38

Capítulo 3:

Tabela 3.1: Requisitos físicos das cais de construção 40

Tabela 3.2: Resistência à compressão da cal hidráulica e da cal hidráulica natural 41

Tabela 3.3: Características químicas das cais aéreas 45

Tabela 3.4: Componentes químicos das cais 46

Capítulo 5:

Tabela 5.1: Susceptibilidade à fendilhação 79

Tabela 5.2: Valores médios de porosidade de argamassas de edifícios históricos 85

Tabela 5.3: Avaliação do comportamento à água com o humidímetro 87

Capítulo 6:

Tabela 6.1: Critérios gerais de decisão sobre o tipo de intervenção 93

Tabela 6.2: Caracterização de argamassas antigas 95

Tabela 6.3: Resistência ao choque de esfera e ao arrancamento 100

Tabela 6.4: Caracterização de argamassas antigas 104

Tabela 6.5: Síntese de requisitos de argamassas de restauro 107

Tabela 6.6: Requisitos mecânicos mínimos para argamassas de revestimentos de edifícios antigos 108

Tabela 6.7: Requisitos de comportamento à água para argamassas de revestimentos de edifícios antigos 108