

Universidade do Porto

FEUP Faculdade de Engenharia

Departamento de Engenharia Civil

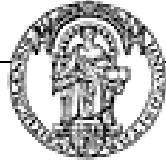
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO 2

1ª PARTE – LIGANTES E CALDAS 2002

actualização 2006



Joana de Sousa Coutinho



Universidade do Porto

FEUP Faculdade de
Engenharia

Departamento de Engenharia Civil

MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO 2

1ª PARTE – LIGANTES E CALDAS 2002

actualização 2006

Joana de Sousa Coutinho

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Betão. Definição	3
2 LIGANTES	4
2.1 Introdução	4
<i>Ex: alcatrão</i>	4
2.2 Gesso	5
2.2.1 Introdução	5
2.2.2 Presa e endurecimento	7
2.2.3 Resistências Mecânicas	9
2.2.4 Outras propriedades	10
2.2.5 Aplicações	11
2.3 Cal aérea e cal hidráulica	15
2.3.1 Introdução	15
2.3.2 Cal aérea	15
2.3.3 Endurecimento da cal aérea	17
2.3.4 Aplicações da cal aérea	18
2.3.5 Cal hidráulica	18
2.3.6 Presa e endurecimento da cal hidráulica	20
2.3.7 Algumas propriedades e aplicações de cal hidráulica	20
2.3.8 Fabrico de cal	21
2.3.9 Comercialização de cais	22
2.3.10 Normalização	22
3. CIMENTOS	28
3.1 Introdução	28
3.2 Definição	30
3.3 Composição da matéria prima	30
3.4 FABRICO	31
3.4.1 Considerações Gerais	31
1. Preparação do cru	31
3.4.2 Preparação do cru	32
3.4.3 Cozedura em forno rotativo	33
3.4.4 Arrefecimento do clínquer. Moagem	37
3.5 Principais componentes do cru e do clínquer Portland	41
3.5.1 Considerações gerais	41
3.5.2 Componentes da matéria prima	41
3.5.3 Notação abreviada	42
3.5.4 Módulos	42
3.5.5 Componentes principais do clínquer	44
3.5.6 Cálculo dos componentes principais do cimento Portland	47
3.6 Hidratação	49
3.6.1 Presa, endurecimento e hidratação	50

3.6.2 Hidratação e microestrutura	55
3.6.3 Calor de hidratação dos componentes	58
3.6.4 Resistência dos componentes hidratados	61
3.6.5 A água no cimento hidratado	62
3.6.6 Resistência química	64
3.7 Propriedades físicas, mecânicas e químicas dos cimentos	66
3.7.1 Massa volúmica dos cimentos	66
3.7.2 Finura	68
3.7.2.1 Introdução	68
3.7.2.2 Métodos de determinação da finura de um cimento	69
3.7.3 Resistências mecânicas	78
3.7.4 Presa	83
3.7.5 Falsa Presa	85
3.7.6 Expansibilidade	85
3.7.6.1 Expansibilidade causada por óxido de cálcio livre	86
3.7.6.2 Expansibilidade causada pelo óxido de magnésio	87
3.7.6.3 Expansibilidade causada por sulfatos de cálcio	88
3.7.7 Resíduo insolúvel	88
3.7.8 Perda ao fogo	89
3.7.9 Cloretos	89
3.8 MODIFICAÇÕES NA COMPOSIÇÃO no CLÍNQUER DO CIMENTO PORTLAND VERSUS USO DE ADIÇÕES	92
3.8.1 Cimento resistente aos sulfatos	96
3.8.2 Cimentos de baixo calor de hidratação	99
3.8.3 Cimento de elevada resistência inicial	100
3.8.4 Cimento branco	101
3.9 ADIÇÕES ou substitutos parciais do cimento Portland	102
3.9.1 Fíleres e filer calcário (L, LL). Cimentos Portland de calcário (CEM II-L e LL)	103
3.9.1.1 Definição e características	103
3.9.1.2 Regulamentação	104
3.9.2 Escória de Alto Forno. Cimentos Portland de escória (CEM II-S) e cimentos de alto forno (CEM III)	105
3.9.2.1 Propriedades hidráulicas latentes	105
3.9.2.2 Escória - Definição e características	105
3.9.2.3 Regulamentação	108
3.9.2.4 Vantagens do uso de escórias	108
3.9.3 Pozolanas. Actividade pozolânica. Classificação das pozolanas	110
3.9.4 Pozolanas naturais	111
3.9.5 Pozolanas artificiais	112
3.9.6 Cinza volante	114
3.9.6.1 Definição e características	114
3.9.6.2 Regulamentação	117
3.9.7 Sílica de fumo	117
3.9.8.1 Definição, características e vantagens	117
3.9.7.2 Efeitos da sílica de fumo	120
3.9.7.3 Regulamentação	123
3.9.8 Cinza de casca de arroz	124
3.9.9 Determinação da reactividade de uma adição tipo II	125
3.9.9.1 Índice de Actividade (adições tipo II)	125

3.9.9.2 Pozolanicidade	127
3.10 Especificações dos cimentos e normalização em Portugal	128
3.11 Cimentos Especiais	134
3.11.1 Cimento Supersulfatado (Ciment mettalurgique supersulfaté)	134
3.11.2 Cimento aluminoso	135
3.11.3 Cimento Expansivo	137
4. CALDAS DE INJECCÃO	138
4.1 INTRODUÇÃO	138
4.2 FABRICO	141
4.3 PROPRIEDADES DA CALDA E NORMALIZAÇÃO	142
4.4 TECNOLOGIA DE INJECCÃO	145
4.5 INJECCÃO PROPRIAMENTE DITA	147
4.6 ANOMALIAS NA INJECCÃO	148
4.7 REINJECCÃO (post-grouting)	148
4.8 NOTAS FINAIS	149
REFERÊNCIAS	149

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O betão e o aço são os materiais estruturais mais usados, por vezes completando-se e noutras vezes competindo um com o outro de tal forma que estruturas de tipo e função semelhantes poderão ser construídas quer com um quer com o outro material de construção. No entanto, muitas vezes o engenheiro conhece pior o betão de uma estrutura do que o aço. De facto o aço é produzido sob condições cuidadosamente controladas e as suas propriedades são determinadas em Laboratório sendo referidas nos documentos de certificação emanados do produtor. Isto é, o projectista apenas terá que especificar o aço de acordo com as normas em vigor e o engenheiro da obra terá que verificar que as tarefas de ligação dos vários elementos de aço sejam bem realizadas.

Numa obra em betão a situação é totalmente diferente, pois, embora a qualidade do cimento seja garantida pelo produtor de cimento de uma forma semelhante ao que acontece com o aço e se utilizem materiais cimentícios adequados, é o betão, e não o cimento, que constitui o material de construção. Os elementos estruturais numa obra em betão em geral são betonados in situ e utilizando-se os materiais adequados, a sua qualidade vai depender sobretudo da mão-de-obra que produz, coloca e cura o betão.

Como a disparidade nos métodos de produção do aço e do betão é tão evidente torna-se muito importante o controlo de qualidade na obra quando é utilizado o material **betão**. Além disso a mão-de-obra ligada à produção do betão não é especializada como noutros tipos de tarefas, tornando-se essencial a fiscalização na obra. Estes factos devem estar presentes na mente do projectista na medida em que um projecto cuidado e detalhado pode ser facilmente viciado se as propriedades do betão efectivamente produzido em obra se desviarem muito das propriedades previstas no projecto.

Do que foi dito não se deverá concluir que é difícil produzir bom betão, pois o betão de má qualidade que se caracteriza, por exemplo, por uma trabalhabilidade inadequada e que endurece transformando-se numa massa não homogénea e com ninhos de pedra, também provem da mistura de cimento, agregados e água. Isto é, os ingrediente de um bom betão são **exactamente os mesmos** de um mau betão e a diferença entre os dois reside na técnica e conhecimentos do “como fazer” (Neville, 1995).

De facto os processos envolvidos na produção de cimento e betão são complexos, como se verifica na Figura 1.

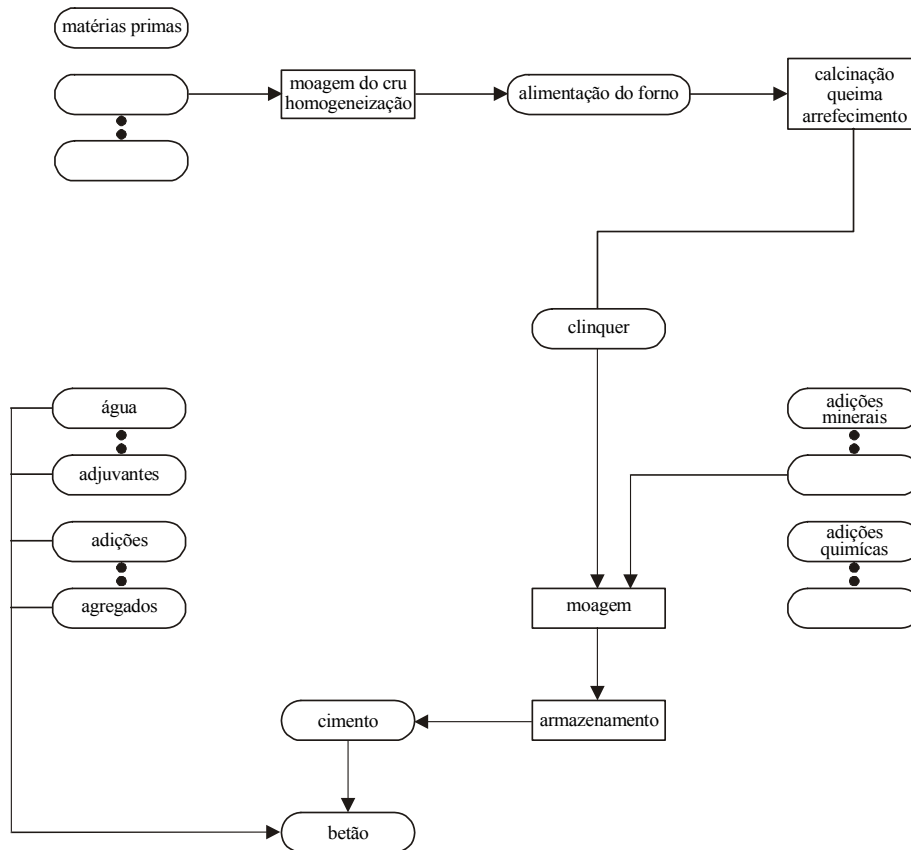


Figura 1 – Fluxograma de materiais e processos na produção de cimento e betão (Johansen, 1999).

As propriedades do betão endurecido são da maior importância e dependem da complexa estrutura interna deste material. Além disso o comportamento do betão fresco e enquanto plástico tem uma influência crucial na estrutura interna e, conseqüentemente nas propriedades do material endurecido. Acresce ainda que a estrutura interna e, portanto, as respectivas propriedades, vão evoluindo ao longo do tempo, interagindo com o ambiente em que o betão está inserido (Construction Materials, 1996).

Assim, saber fazer “betão de qualidade” implica avaliar o ambiente onde a estrutura do betão vai ser inserida, procurando prever as interações ambiente/betão; conhecer o comportamento dos constituintes; controlar as fases de produção, transporte,

colocação, compactação - isto é, o seu comportamento no estado fresco, assim como garantir uma eficiente protecção e cura.

Um betão de qualidade assim concebido e realizado terá uma estrutura interna que evolui ao longo do tempo mas cujas propriedades satisfazem os requisitos pretendidos durante o período de vida útil prevista para essa estrutura.

Em resumo, poder-se-á dizer que o BETÃO é um material compósito cujas propriedades dependem:

- da qualidade dos constituintes
- da qualidade de mão-de-obra que o produz e coloca
- das condições ambientais a que estará exposto durante a sua vida útil (Skalny, 1989).

Repare-se que com a evolução dos conhecimentos actuais relacionados com o betão, torna-se fundamental que os engenheiros, empreiteiros e técnicos ligados à construção levem a sério o desafio proposto por Sitter e designado pela “Lei dos cinco”:

«Uma libra (escudo, dólar, Euro, ...) investido na fase A, corresponde a 5 libras na fase B, 25 na fase C e 125 na fase D, em que:

- A - Projecto, construção e cura do betão
- B - Processos de iniciação da corrosão em curso mas as fases de propagação e portanto de deterioração ainda não começaram.
- C - Fase de propagação da corrosão iniciada
- D - Estado de propagação avançada » (Geiker, 1999).

Isto é, é fundamental investir sobretudo na fase de concepção, construção (produção, transporte, colocação, COMPACTAÇÃO) protecção e cura do betão - a fase A.

1.2 BETÃO. DEFINIÇÃO

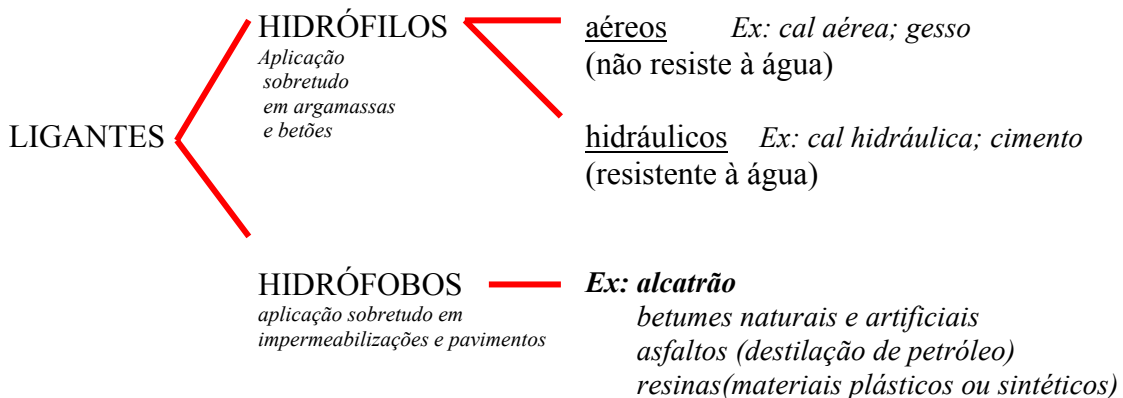
O betão é um material constituído pela mistura devidamente proporcionada de agregados (em geral brita ou godo e areia) com um ligante hidráulico, água e eventualmente adjuvantes e/ou adições.



2 LIGANTES

2.1 INTRODUÇÃO

Um **ligante** é um produto que ganha presa e endurece, podendo aglomerar outros materiais, tais como agregado grosso e areia. São portanto substâncias com propriedades AGLOMERANTES.



Um **ligante hidrófilo** é um ligante que tem afinidade com a água e misturado com ela forma uma pasta que endurece, podendo, como qualquer ligante, aglomerar outros materiais. É constituído por matéria sólida finamente pulverizada. Ex: cal aérea, gesso, cal hidráulica, cimento.

Os ligantes hidrófilos podem-se classificar em aéreos ou hidráulicos.

Um **ligante hidrófilo aéreo** é um ligante que misturado com a água forma uma pasta que endurece ao ar.

A pasta endurecida, com ou sem outros materiais incorporados, não é resistente à água. Ex: cal aérea, gesso.

Um **ligante hidrófilo hidráulico** é um ligante que misturado com a água forma uma pasta que endurece ao ar ou dentro da água e a pasta endurecida, com ou sem outros materiais incorporados, resiste à água. Ex: cal hidráulica, cimento.

Um **ligante hidrófobo** (repelente de água) é um ligante em que a água não tem qualquer papel na produção e endurecimento do aglomerante e que “repele” a água após endurecimento. É constituído por substâncias mais ou menos viscosas que endurecem por arrefecimento, por evaporação dos seus dissolventes ou por reacção química entre diferentes componentes.

Apresentam-se, não sob a forma de pó como os ligantes hidrófilos, mas sob a forma de líquidos viscosos ou soluções resinosas e ao endurecer formam estruturas coloidais rígidas. Exs: alcatrão, proveniente de carvão, sobretudo de hulha), asfaltos (provenientes da destilação de petróleo), matérias plásticas ou sintéticas como resinas.

2.2 GESSO

2.2.1 Introdução

A família dos “gessos” é um conjunto de ligantes simples constituídos basicamente por sulfatos mais ou menos hidratados de cálcio e sulfatos anidros de cálcio obtidos por desidratação e cozedura da Pedra de Gesso ou Gesso Bruto.

O gesso encontra-se abundantemente na natureza, em terrenos sedimentares, apresentando-se sob a forma de Anidrite – CaSO_4 ou Pedra de Gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Sampaio, 1978).

A Pedra de Gesso ou Gesso Bruto é extraído das gesseiras e constituída essencialmente por sulfato de cálcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) podendo conter impurezas como sílica, alumina, óxido de ferro, carbonatos de cálcio e magnésio.



A Pedra de Gesso se submetida a tratamento térmico em fornos especiais dá origem a compostos diversos, mais ou menos hidratados e com propriedades diferentes, de acordo com a temperatura de cozedura:

- Entre 130 e 160°C o composto perde 1.5 moléculas de água dando origem ao gesso de Paris, gesso para estuque ou gesso calcinado – $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$.
- Este gesso é mais solúvel na água do que o Gesso Bruto.
- Entre 170 e 280°C obtém-se a anidrite solúvel – CaSO_4 de presa rápida (gesso rápido), transformando-se em $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ em presença de água.
- Entre 400 e 600°C forma-se uma anidrite insolúvel, que portanto não reage com a água, não ganhando presa.
- Cerca de 1100°C forma-se o gesso para pavimentos que é uma anidrite de presa lenta. O gesso para pavimentos necessita de pouca água de amassadura e após endurecimento apresenta maior resistência e dureza e menor porosidade e sensibilidade à água do que o gesso de Paris. É pouco usado devido ao facto da sua produção exigir temperaturas elevadas de cozedura. Embora a presa demora cerca de 5 horas é possível reduzi-la para cerca de 30 minutos utilizando aceleradores, como por exemplo sulfato de alumínio (Duriez, 1950; NP 315, 1963; Sampaio, 1978; Bauer, 1992 e Moreira, 1999).

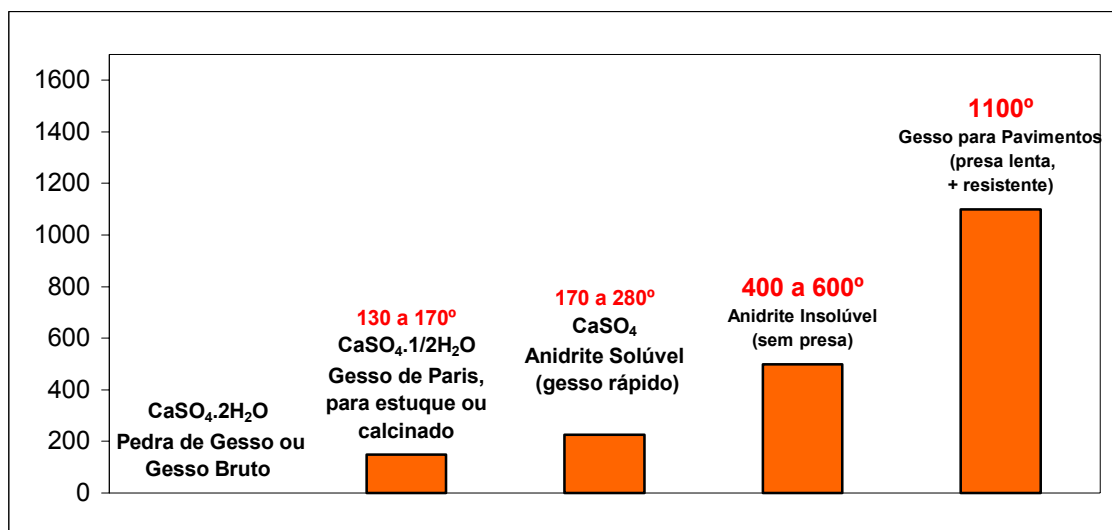
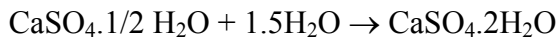


Figura 2 – Produtos obtidos a partir da Pedra de Gesso, de acordo com as temperaturas (°C).

O gesso para construção ou gesso comercial é constituído por uma mistura de cerca de 60 a 70% de $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ e o restante de anidrite (Bauer, 1992) também podendo conter impurezas e adjuvantes. Num estudo levado a cabo no LNEC o gesso de construção em Portugal demonstraram um teor de $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ entre 77 e 97% (Oliveira e Rodrigues).

2.2.2 Presa e endurecimento

Os sulfatos de cálcio hemi-hidratado e anidro, em presença de água reconstituem rapidamente o sulfato bi-hidratado original, isto é, o gesso bruto como reacção inversa ao seu fabrico:



Esta reacção é fortemente EXOTÉRMICA e expansiva, formando-se uma fina malha de cristais em forma de longas agulhas que se interpenetram dando coesão ao conjunto.

De facto uma das características mais notáveis do gesso é que a presa se faz com aumento de volume, o que tem vantagens quando se trata de enchimento de moldes, porque deixam de haver falhas dentro dos moldes. Além deste facto há a salientar que o acabamento das superfícies de gesso é muito perfeito. Por estas razões o gesso foi e é muitas vezes usado em ornamentações delicadas de tectos e paredes.

Depois da presa o gesso continua a endurecer num processo que pode durar semanas. A presa e endurecimento dependem dos seguintes factores:

- ❑ natureza dos compostos desidratados originados pela temperatura e tempo do tratamento térmico sofrido, como visto atrás.
- ❑ finura
- ❑ presença de impurezas
- ❑ presença de adjuvantes (por ex. retardadores de presa)
- ❑ quantidade de água de amassadura

Relativamente à **finura**, quanto mais moído for o gesso, maior será a sua superfície específica e conseqüentemente a superfície do material exposto à hidratação, pelo que a presa será mais rápida (para a mesma quantidade de água de amassadura).

A presa e o endurecimento do gesso tratado termicamente são também atrasados por **impurezas** que existam no Gesso Bruto (produto natural).

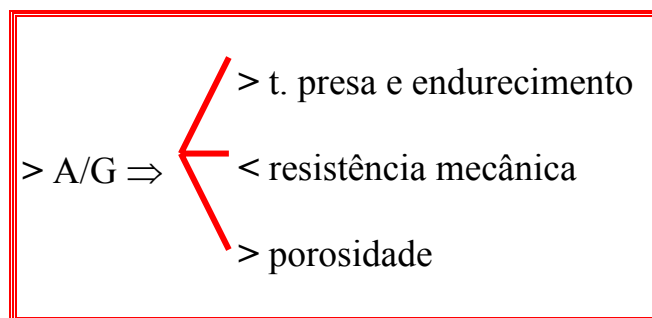
É possível também, obter gesso de presa mais lenta por incorporação de “retardadores” de presa tais como cola, serrim fino de madeira, etc., em proporções muito reduzidas (0.1 a 0,5%).

A quantidade de água utilizada na amassadura de gesso, a **água de amassadura**, influencia muito a presa e o endurecimento, e, conseqüentemente a resistência e porosidade. De facto a presa é tanto mais rápida quanto mais se reduzir a quantidade de água no sentido de a aproximar da estritamente necessária à hidratação de dada quantidade de gesso (para o composto $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ é cerca de 25% em massa). Se se utilizar apenas a quantidade mínima, a presa é demasiado rápida e portanto não é manuseável, não é trabalhável, pelo que se utiliza sempre, na prática, uma quantidade de água maior.

De facto o $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ é um produto muito solúvel na água. Então quando se mistura gesso com água, o $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ dissolve-se dando origem ao $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, que não é tão solúvel e que ao fim de algum tempo precipita, por se ter dado a saturação da solução. Aquando da precipitação formam-se cristais que vão constituir um sistema rígido.

Quanto mais água se emprega na amassadura maior é o tempo de presa, pois mais tempo leva a solução a ficar saturada, e portanto a cristalização faz-se mais tarde.

Portanto:



A – massa de água de amassadura
G – massa de gesso

Em geral para o gesso de construção a amassadura é feito com uma quantidade de água de cerca de 0.6 a 0.75, verificando-se o princípio de presa entre 2 a 6 minutos e o fim de presa (gesso já sólido, consistente) de 15 a 30 minutos (Duriez, 1952).

Como exposto anteriormente, para aumentar o tempo de presa, pode-se utilizar uma quantidade maior de água de amassadura com os inconvenientes de se obter resistência mecânica inferior e maior porosidade. É possível retardar a presa sem aumentar a água, utilizando um retardador de presa (por exemplo gelatina, cola forte, cal apagada, água quente) e portanto aumentar a resistência e diminuir a porosidade.

2.2.3 Resistências Mecânicas

A resistência mecânica do gesso após presa depende da quantidade de água embebida, isto é, presente na rede porosa e que não foi necessária para a formação de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Os cristais formados são solúveis na água pelo que se o gesso após presa é mantido num ambiente saturado praticamente não endurece. Se o gesso após presa é conservado num ambiente não saturado, vai endurecendo à medida que a água embebida se evapora e a resistência vai aumentando. Por exemplo ao ar livre para uma humidade relativa média, a resistência do gesso pode duplicar entre o 1º e o 7º dia após a amassadura.

Mesmo depois de seco, a resistência à compressão pode reduzir a um quarto ou mesmo um sexto se for embebido em água (Duriez, 1952). Isto é, o gesso não resiste à

humidade e acaba mesmo por apodrecer nessas condições, só se utilizando no exterior, em climas secos.

Na Figura 3 apresentam-se os resultados médios de ensaios efectuados aos 28 dias em provetes secos e saturados da resistência à compressão e à tracção em função da água de amassadura.

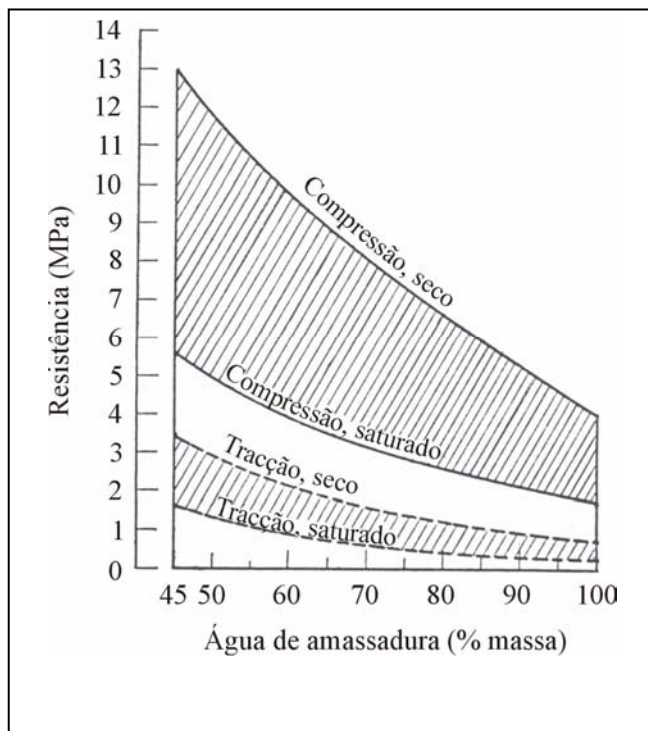


Figura 3 – Resistências médias em provetes secos e saturados de gesso de construção, conservados 28 dias em ar seco.

As resistências aproximadas à compressão e tracção, de gesso de construção conservado 28 dias num ambiente com humidade relativa média são dadas no quadro seguinte (Duriez, 1952).

	A/G	Resistência (MPa)	
		à compressão	à tracção
Gesso de construção fino	75%	4.5	1.5
Gesso de construção grosso	60%	5.5	1.2

A – massa de água de amassadura
G – massa de gesso

Repare-se que a resistência à compressão é cerca de três a quatro vezes superior à resistência à tracção. No betão o factor correspondente é cerca de dez.

Repare-se também que no gesso, a resistência mecânica depende não só da água de amassadura, mas também do estado de embebição, isto é, da quantidade de água contida na rede porosa, como exposto anteriormente. No betão a resistência mecânica depende sobretudo da água de amassadura e não diminui com o aumento da água de embebição, pelo contrário, irá aumentar com a continuação do processo de hidratação do cimento.

2.2.4 Outras propriedades

Como apontado anteriormente a principal desvantagem deste material é não resistir à humidade, em virtude ser dissolvido pela água. É apenas utilizado em ambientes eventualmente húmidos se protegido com uma pintura impermeável. No entanto apresenta uma série de vantagens e desvantagens que se resumem seguidamente:

- ❑ Económico. O gesso é um material económico devendo substituir o cimento sempre que possível. De facto, para fabricar 1 tonelada de cimento Portland são necessários cerca de 300 kg de carvão e para 1 tonelada de gesso são necessários cerca de 80 a 90.
- ❑ Bom acabamento.
- ❑ Bom isolamento Térmico e Acústico.
- ❑ Resistência ao fogo. De facto a resistência ao fogo deste material é elevado pois no início, o calor é dispensado na desidratação do gesso.

- ❑ Água Salgada. O gesso é cinco vezes mais solúvel em água do mar (ou água com cloreto de magnésio) do que em água doce.
- ❑ Corrosão do ferro e aço. O gesso corrói o ferro e o aço pelo que não se podem usar ferramentas e utensílios destes materiais, preferindo-se a utilização de ferramentas em latão, pregos ou parafusos com crómio, pregos ou parafusos e armaduras galvanizadas com zinco puro (por exemplo o zinco com 1 a 2% é atacado) e no caso de se aplicar gesso por exemplo em tectos, as armaduras têm de estar totalmente protegidas com argamassa (de cimento).
- ❑ Má aderência a superfícies lisas, sobretudo a madeira, pelo que se desenvolveram no passado, técnicas apropriadas para obviar este inconveniente: o estuque e o estafe.

2.2.5 Aplicações

O estuque e o estafe são técnicas de aplicação de gesso que hoje não são utilizadas a não ser em obras de reabilitação.

Estuque – consiste no revestimento de paredes, tectos e outras superfícies rebocadas de estruturas de edificios feito com pasta de gesso para estuque (gesso calcinado a cerca de 140°C e misturada com cal ou outro retardador) e à qual se adicionaram outros materiais convenientes como por exemplo, gelatina ou cola forte. O estuque é colocado entre e sobre fasquias de madeira dispostas de modo a permitir melhor aderência – Figura 4.

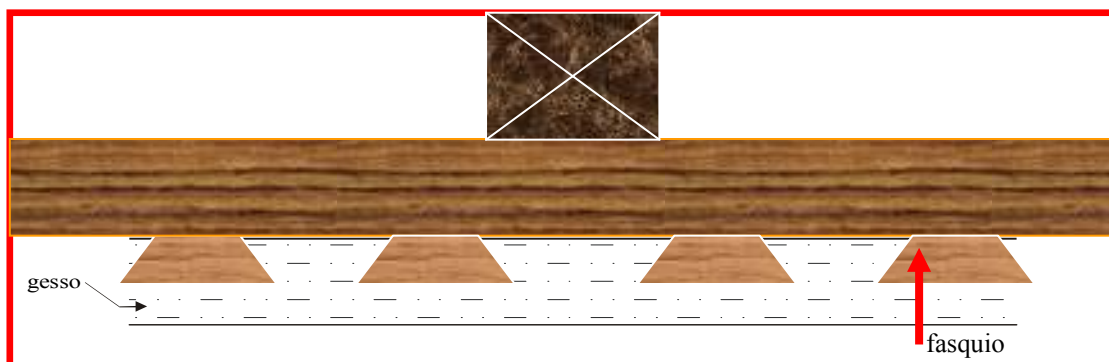


Figura 4 – Aplicação de estuque (Sampaio, 1975).

Esta técnica caiu em desuso em virtude da falta de mão de obra e também devido às deformações sofridas pelas peças em madeira preferindo-se hoje o uso de gesso sob a forma de placas pré-fabricadas (NP 315 e Sampaio, 1975).

Estafe – Placas pré-fabricadas de 1 a 2 cm de espessura, constituídas por gesso, armadas com fibras vegetais (estopa, sisal, linho, etc.), dispersas que conferem maior resistência à flexão.

Estas placas são aparafusadas aos barrotes intervalados de cerca de 1 metro. Os parafusos não podem ser de aço, como dito. As juntas das placas e remates são colmatadas com “linhada de gesso” fabricada no local e que consiste numa pasta de gesso armada com fios de linho ou sisal.

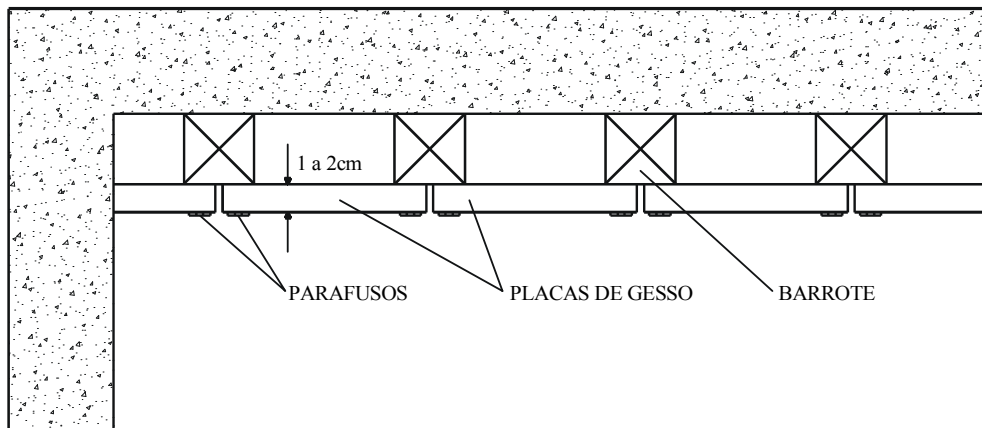


Figura 5 – Placas pré-fabricadas formando o estafe (Sampaio, 1975).

Hoje em dia, existem vários tipos e marcas de **gesso de construção** – Figura 6, para executar trabalhos moldados em obra, pré-fabricados ou mesmo para base na formulação de colas ou massas.



Figura 6 – Gesso para construção vendido a saco.

Além do gesso de construção existe uma série de produtos aplicáveis na construção obtidos a partir do gesso tais como:

- peças pré-fabricadas para decoração – Figura 7.



Figura 7 – Produtos pré-fabricados de gesso, para decoração.


- **Gesso Cartonado** – placas de gesso prensado entre duas folhas de cartão.
 - Exs: Pladur – Figura 8 
 - Placoplatre – Figura 9



Figura 8 – Gesso cartonado Pladur.



Figura 9 – Aplicação de gesso cartonado Placoplatre.

- **Gesso prensado** – placas de gesso prensado Ex: Knauff – Figuras 10 e 11.



Figura 10 - Placas perfuradas Knauff entre as vigas de aço visíveis. Restaurantes no piso superior do Parlamento de Berlim (Reichstag).



Figura 11 - Tecto em gesso. Entrada principal da Embaixada alemã em Washington (proj. Arq. O.M. Ungers) Pré-fabricação e montagem na Alemanha.

Existem hoje um sem número de outros produtos aplicáveis na construção civil e que englobam o material gesso, tais como placas mistas, placas reforçadas com fibras celulósicas, etc..

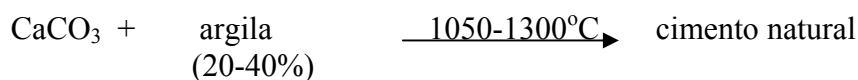
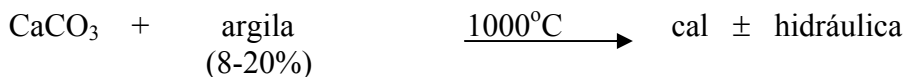
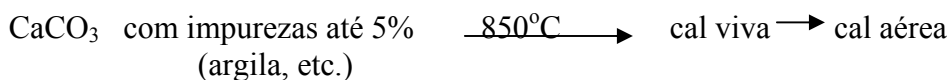
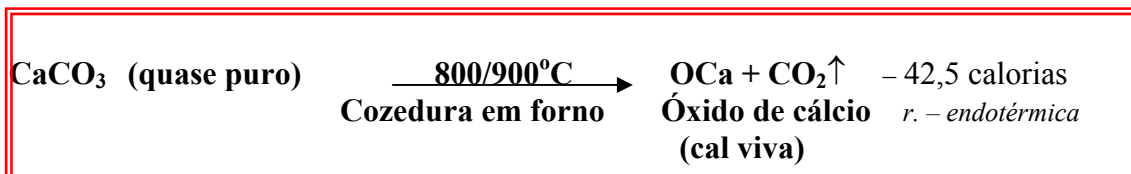
2.3 CAL AÉREA E CAL HIDRÁULICA

2.3.1 Introdução

Um dos ligantes artificiais mais antigos é o ligante que resulta da cozedura dos calcários, constituídos sobretudo por CaCO_3 , mais abundantes na natureza. Associada a estes existe sempre a argila, em maior ou menor quantidade, porque a precipitação do carbonato de cálcio em águas de grande tranquilidade arrasta consigo a argila que porventura esteja em suspensão. Obtém-se então o calcário margoso; quando a argila é em quantidade superior ao carbonato forma-se uma **marga calcária**. Assim, os calcários podem ser muito puros ou conterem quantidades variáveis de argila (Coutinho, 1988).

Calcário	$\text{CaCO}_3 \sim 100\%$
Calcário margoso	$\text{CaCO}_3 + \text{argila} (<50\%)$
Marga calcária	$\text{argila} + \text{CaCO}_3 (<50\%)$

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



2.3.2 Cal aérea

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

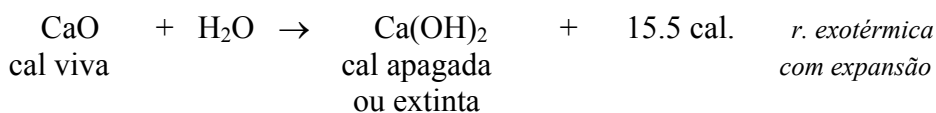
calcários com teores de argila e de outras impurezas compreendidos entre 1 e 5% (Coutinho, 1988).

Chamam-se gordas às primeiras devido às suas propriedades plásticas, pois trata-se de cais facilmente trabalháveis e bastante macias. As cais magras não são tão fáceis de trabalhar nem tão macias. A reacção de presa é a mesma para qualquer delas (Sampaio, 1975).

Como o magnésio aparece muitas vezes associado ao cálcio, são frequentes na natureza calcários com maior ou menor percentagem de dolomite ($MgCO_3$) (Coutinho, 1988). Assim a cal aérea pode ser **cálcica** quando é sobretudo constituída por óxido de cálcio (CaO) ou **dolomítica** constituída sobretudo por óxido de cálcio e óxido de magnésio. Segundo a normalização europeia uma cal aérea cálcica designa-se por uma sigla que contém as letras **CL** e uma cal aérea dolomítica designa-se por uma sigla que contém as letras **DL**.

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

A **cal viva** apresenta-se sob a forma de grãos de grandes dimensões com 10, 15 ou 20 cm – são as pedras (ou blocos) de cal viva (Bauer, 1992) ou sob a forma de pó. A cal viva é um produto sólido, de cor branca com grande avidez pela água. Isto é, para a obtenção e posterior aplicação do hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$, é necessário proceder à hidratação da cal viva. A esta operação chama-se **extinção** da cal:



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

A **imersão** corresponde à extinção da cal viva com excesso de água e é feita mergulhando os blocos de cal viva em água obtendo-se uma pasta – **pasta de cal** ou **pasta de cal apagada** que endurece lentamente. De facto é um produto muito pouco poroso e permeável, com difícil e lenta recarbonatação que pode durar mais de 6 semanas, por vezes. Existem argamassas romanas que ainda se encontram moles no seu

interior, devido a camada exterior de carbonato de cálcio não deixar penetrar o CO₂, impedindo assim a recarbonatação em zonas mais profundas (Sampaio, 1978).

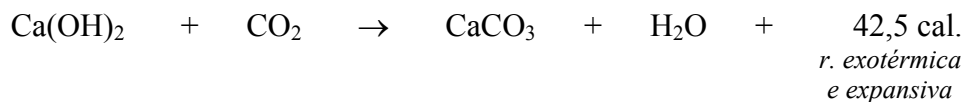
A **aspersão** consiste na extinção da cal viva com aspersão de água estritamente necessária à hidratação. Como se verifica expansão à medida que a cal se vai hidratando, o produto pulveriza-se (Sampaio, 1978).

As cais extintas são portanto cais aéreas, principalmente constituídas por hidróxido de cálcio e, eventualmente, de magnésio que resultam da extinção da cal viva. As cais extintas não têm reacção exotérmica quando em contacto com a água. São produtos sob a forma de pó seco ou mistura aquosa (NP EN 459-1, 2002) (pasta de cal – *lime putty*, ou leitada de cal).

Portanto, uma **cal aérea** é um ligante constituído sobretudo por óxidos de cálcio, CaO ou hidróxidos de cálcio, Ca(OH)₂ que endurece lentamente ao ar por reacção com o dióxido de carbono. Em geral não endurece na água pois não possuem propriedades hidráulicas. Pode-se tratar de uma cal viva ou de uma cal apagada (NP EN 459-1, 2002).

2.3.3 Endurecimento da cal aérea

Depois de aplicada, o endurecimento da cal aérea faz-se em duas fases. Numa primeira fase (presa inicial) dá-se a evaporação da humidade em excesso, ao fim da qual a cal está firme ao tacto mas ainda é marcável com a unha. Na segunda fase, a fase de recarbonatação, dá-se uma reacção química muito lenta, ao ar, (daí o nome de aérea), em que o hidróxido se reconverte em carbonato de cálcio por recombinação com o dióxido de carbono (CO₂). A velocidade desta fase de recarbonatação depende da temperatura, da estrutura porosa e da humidade da pasta podendo demorar anos a completar-se:



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

2.3.4 Aplicações da cal aérea

Repare-se que o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) é solúvel na água (1,3g/l) e ainda mais na água salgada. Portanto, além de não ganhar presa nem endurecer em água, é ainda mais solúvel em água salgada, pelo que não pode ser usado em obras hidráulicas nem marítimas.

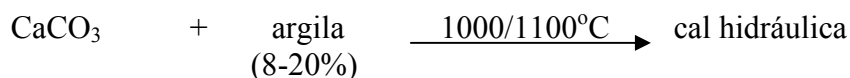
Até há cerca de 200 anos (quando apareceu a cal hidráulica) o ligante usado em todas as construções era a cal. Hoje ainda é utilizada por exemplo no fabrico de blocos sílico-calcários, misturada com gesso, no fabrico de estuques, misturada com pozolanas constituindo ligantes hidráulicos, misturada com cimento ou cal hidráulica em argamassas para reboco e ainda sob a forma de **leitada** na caiação de muros. (Note-se que terá vantagem na caiação utilizar areia, para que não se verifique microfissuração e também tornar o produto mais económico).

(Sampaio 1975; Coutinho, 1988; Bauer, 1992; Moreira, 1998).

2.3.5 Cal hidráulica

Como indicado anteriormente a pedra calcária (CaCO_3) que contenha de 8 a 20% de argila, se tratada termicamente a cerca de 1000°C , dá origem a cal hidráulica que é um produto que endurece tanto na água como no ar.

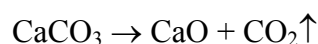
A cal hidráulica é constituída por silicatos ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$) e aluminatos de cálcio ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$) que hidratando-se endurecem na água ou ao ar e também por óxido de cálcio (CaO) – pelo menos 3%, que continua livre e que vai endurecer por carbonatação.



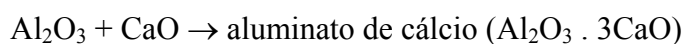
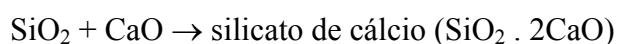
A preparação da cal hidráulica é feita em fornos, verificando-se as seguintes fases:

500 a 700°C _____ desidratação da argila

850°C _____ decomposição do calcário



$1000\text{--}1100^\circ\text{C}$ _____ Reacção da sílica e alumina da argila com o óxido de cálcio, originando silicatos e aluminatos



Repare-se que se a temperatura de cozedura for mais alta (até 1500°C) e a percentagem de argila (sílica e alumina) for maior a reacção é mais completa, isto é a quantidade de silicatos e aluminatos de cálcio é maior, diminuindo a quantidade de óxido de cálcio livre e no extremo as reacções serão semelhantes às que se passam no fabrico do cimento.

Portanto, a cerca de 1000°C a reacção é parcial e os produtos formados são uma mistura de silicatos e aluminatos de cálcio com óxido de cálcio livre.

Depois da saída do forno obtém-se pedaços de várias dimensões constituídos pela mistura de silicatos e aluminatos de cálcio e cal livre (mais de 3%, em regra cerca de 10%) e ainda um pó inerte que é silicato bicálcico formado por pulverização durante o arrefecimento (657°C).

Este pó amassado com água não aquece nem ganha presa.

A cal retirada do forno deve ser extinta, não só com o fim de eliminar a cal viva, mas muito especialmente para provocar a pulverização de toda a cal hidráulica. É este fenómeno que distingue a cal hidráulica do cimento Portland: a finura da cal hidráulica é parcialmente obtida por extinção da cal viva e não por moagem.

A extinção deve ser feita com certa precaução pois só se deve adicionar apenas a água estritamente necessária para hidratar a cal viva; é a reacção expansiva desta (dobra de volume, sensivelmente) que se aproveita para pulverizar os grãos que contêm os aluminatos e silicatos; a água em excesso iria hidratá-los.

A cal viva precisa ser completamente extinta, antes de se utilizar a cal hidráulica na construção.

A extinção é realizada lentamente a temperaturas entre 130 e 400°C e após a extinção obtém-se:

{	Pó	{	silicatos e aluminatos de cálcio
	Grappiers		hidróxido de cálcio (Ca(OH) ₂) – cal apagada, extinta

Os grappiers são grãos de material sobreaquecido com verdadeiras características de cimento, mais escuros e duros e ricos em silicatos bicálcicos.

Assim, após a extinção é necessário separar os grappiers do pó e proceder à sua moagem.

Em geral a separação é feita em peneiros circulares rotativos constituídos por tambores perfurados concêntricos sendo o tambor interior de malha com mais abertura para permitir a passagem dos grappiers – Figura 12.

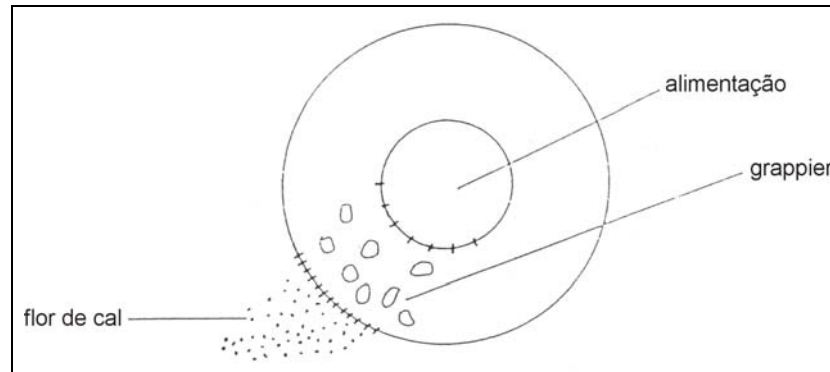


Figura 12 - Peneiração da cal hidráulica para separação dos grappiers (Sampaio, 1975)

Finalmente, após a moagem dos grappiers o pó resultante é adicionado ao pó de silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio formando cal hidráulica. Pode ser conveniente juntar ainda materiais pozolânicos moídos.

(Sampaio, 1975; Coutinho, 1988).

2.3.6 Presa e endurecimento da cal hidráulica

O endurecimento da cal hidráulica compreende duas reacções. Na primeira reacção dá-se a hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio, quer na água quer no ar. Na segunda reacção dá-se a recarbonatação da cal apagada, só ao ar e em presença do dióxido de carbono.

2.3.7 Algumas propriedades e aplicações de cal hidráulica

A massa volúmica média da cal hidráulica é cerca de $2,75 \text{ g/cm}^3$, mais baixa do que a do cimento e a sua baridade toma valores entre $0,6$ e $0,8 \text{ g/cm}^3$. A sua cor é a cor parda do cimento. Como a cal hidráulica é muito semelhante ao cimento (cor), pode prestar-se a falsificações, o que muitas vezes tem consequências desastrosas, porque a cal hidráulica tem menor resistência que o cimento.

Utiliza-se a cal hidráulica em aplicações idênticas às do cimento, que não exijam resistências mecânicas elevadas como em argamassas (pobres):

Argamassa de revestimento

Argamassas para reboco de paredes

Argamassas para alvenaria

etc.

Note-se que a existência de cal nestas argamassas (pobres) pode ser um problema, já que existe sempre uma parte de CaO que não desaparece completamente e que ao extinguir-se dá origem a expansões.

(Sampaio, 1978; Coutinho, 1988; Moreira, 1998).

2.3.8 Fabrico de cal

As cals aérea e hidráulica podem ser produzidas em vários tipos diferentes de fornos. Dão-se exemplos nas Figuras 13 e 14.

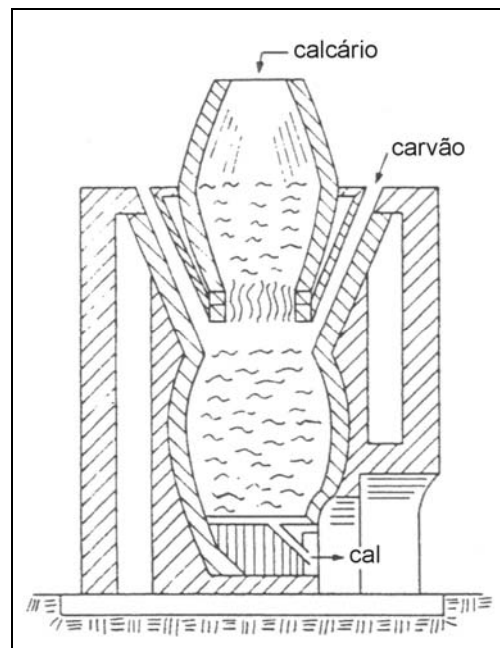


Figura 13 – Forno vertical, a carvão, para cal.

A Figura 13 apresenta o esquema de um forno contínuo vertical, que utiliza combustível de chama curta – carvão. Consta de duas câmaras sobrepostas, sendo o calcário alimentado por uma abertura junto à chaminé superior e o combustível introduzido no estrangulamento entre as duas câmaras onde se processa a combustão. O arrefecimento do material dá-se na câmara inferior, onde o ar necessário à combustão é aquecido, com melhoria evidente em termos de rendimento térmico. O material calcinado é extraído pela parte inferior da câmara de arrefecimento (Bauer, 1992).

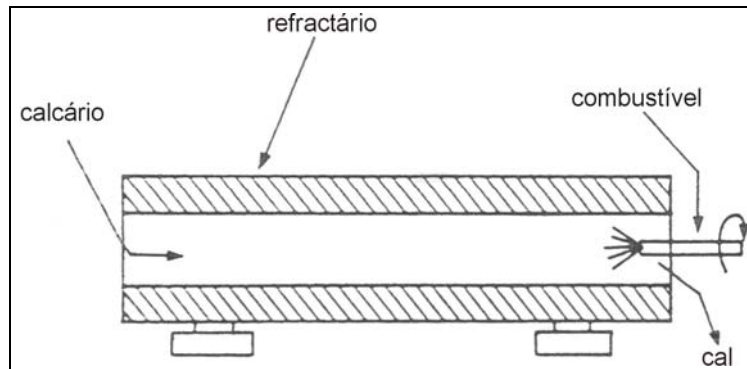


Figura 14 - Forno rotativo de eixo horizontal.

Os fornos rotativos, constituídos por um cilindro metálico internamente revestido de material refractário, giram lentamente sobre um eixo ligeiramente inclinado, recebendo o calcário pela sua boca superior e tendo o maçarico de aquecimento na sua boca inferior, por onde também é retirado o material calcinado – Figura 14.

2.3.9 Comercialização de cais

Existem cais comercializadas fornecidas em saco, a granel ou ainda, no caso de misturas aquosas (cais aéreas extintas) em recipientes apropriados – Figura 15.



Figura 15 - Alguns exemplos de cais comercializadas.

2.3.10 Normalização

A norma europeia referente às cais é constituída por 3 partes e foi publicada entre nós em 2002:

NP EN 459-1 (2002). Cal de construção Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade.

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

NP EN 459-3 (2002). Cal de construção Parte 3: Avaliação da conformidade.

Da parte 1 transcreve-se o quadro e notas, *em itálico>, da Figura 16, relativamente á* composição química.

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

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

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

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

Figura 16 – Classificação das cais de construção de acordo com a normalização europeia.

A classificação das cais de construção, preconizada na normalização europeia, baseia-se na composição química para as cais aéreas, cálcicas (CL) e dolomíticas (DL) e na resistência á compressão, para as cais hidráulicas (HL). Para as cais aéreas a sigla é constituída por CL ou DL, seguida de um número que indica a percentagem mínima de óxido de cálcio e óxido de magnésio que a cal contém, de acordo com o quadro da figura anterior.

Nas cais hidráulicas a sigla é constituída por HL ou NHL, seguida do valor 2, 3,5 ou 5 conforme a classe de resistência e de acordo com o Quadro 1.


Uma **cal hidráulica (HL)** é, segundo a normalização europeia, um ligante constituído sobretudo por hidróxido de cálcio, silicatos e aluminatos de cálcio, produzido pela mistura de materiais adequados e que tem a propriedade de ganhar presa e endurecer em água. O dióxido de carbono atmosférico também contribui para o processo de endurecimento. Uma **cal hidráulica natural (NHL)** é uma cal produzida pela calcinação de calcários mais ou menos argilosos ou siliciosos e posterior redução a pó por extinção com ou sem moagem. Todos os tipos de cal hidráulica natural tem a propriedade de ganhar presa e endurecer em água e o dióxido de carbono atmosférico contribui também para o processo de endurecimento.

Quadro 1 – Resistência à compressão de cal hidráulica e cal hidráulica natural (NP EN 459-2)

Tipos de cais de construção	Resistência à compressão MPa	
	7 dias	28 dias
HL e NHL2	-	≥ 2 a ≤ 7
HL 3,5 and NHL 3,5	-	$\geq 3,5$ a ≤ 10
HL 5 and NHL 5	≥ 2	≥ 5 a $\leq 15^a$
HL 5 e NHL 5 com baridade inferior a $0,90\text{kg/dm}^3$, é permitia uma resistência até 20 MPa.		


Nota: Sabe-se que argamassas com ligantes cálcicos adquirem resistência que aumenta lentamente com a carbonatação.

Nas Figuras 17 e 18 apresentam-se fichas técnicas de cal hidráulica comercializada em Portugal.



Cal Hidráulica Natural NHL 5

**NP EN 459-1
0856**



Constituintes

- Calcário margoso cozido com extinção e moagem
- Sulfato de cálcio regulador de presa

● Características							
<ul style="list-style-type: none">● Químicas Sulfatos (SO_3) $\leq 3,0\%$ Cal livre $\geq 3\%$● Físicas Início de presa (min) ≥ 60 Expansibilidade (mm) ≤ 20 Resíduo a 0,090 mm $\leq 15\%$ Baridade (g/l) ≥ 600● Mecânicas Resistência à compressão - Valores mínimos 7 dias: 2,0 MPa 28 dias: 5,0 MPa	<p>Resistência mecânica à compressão Curva de crescimento mínimo</p> <table border="1"><thead><tr><th>Tempo (dias)</th><th>Resistência (MPa)</th></tr></thead><tbody><tr><td>7</td><td>2,0</td></tr><tr><td>28</td><td>5,0</td></tr></tbody></table>	Tempo (dias)	Resistência (MPa)	7	2,0	28	5,0
Tempo (dias)	Resistência (MPa)						
7	2,0						
28	5,0						
● Propriedades especiais das argamassas fabricadas com cal hidráulica do Cabo Mondego							
<ul style="list-style-type: none">• Grande plasticidade e elevada trabalhabilidade• Forte aderência• Grande poder de retenção de água, opondo-se à retracção inicial• Fraca tendência para a fissuração e fendilhamento• Boa impermeabilidade e durabilidade							
● Utilizações recomendadas							
<ul style="list-style-type: none">● Argamassas de todos os tipos (enchimento, reboco, assentamento e acabamento).● Pré-fabricação (misturada com cimento) Blocos de alvenaria e abobadilha. Artefactos.● Pavimentos rodoviários. Na substituição do filer dos betuminosos. No tratamento de solos húmidos e argilosos.● Em trabalhos diversificados no meio rural.							
● Precauções na aplicação							
<ul style="list-style-type: none">• Na dosificação e na relação água/ligante.• No processo de cura da argamassa fresca, assegurar uma protecção cuidadosa contra a dessecação, principalmente em tempo quente.• Preparar adequadamente o suporte para receber a argamassa.							
● Contra-indicações							

- Trabalhos sob temperaturas muito baixas.
- Contacto com ambientes agressivos (águas e terrenos).

Acondicionamento





Saco
40 Kg

Palete de tara perdida
30 Sacos • 1200 Kg

Palete a devolver
40 Sacos • 1600 Kg



Granel
25 toneladas

Camião de 25 toneladas com meios de descarga, devidamente selado.

Figura 17 – Ficha técnica de cal hidráulica HL5 (Cimpor).

Cal Hidráulica Martingança € €



FICHA TÉCNICA

1. Descrição:

A *Cal Hidráulica Martingança* é um ligante hidráulico constituído maioritariamente por silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio. Obtém-se por cozedura de calcário argiloso (marga), seguida de moagem e adição de sulfato de cálcio para regularização da presa.

As suas características físicas e químicas colocam a *Cal Hidráulica Martingança* na classe de resistência superior (NHL5) segundo a NP EN 459-1:2003 do CEN. O LNEC emitiu para a *Cal Hidráulica Martingança*, em 29 de Julho de 2003, o certificado nº 0856-CPD-0202, relativo à marcação CE deste produto.

2. Domínio de utilização:

- Na fabricação de argamassas, como único ligante ou em mistura com outros ligantes hidráulicos ou aéreos, conferindo-lhes trabalhabilidade e flexibilidade, reduzindo significativamente a retracção das argamassas hidráulicas.
- Na fabricação de argamassas de reabilitação, como único ligante, em execução de rebocos exteriores sobre suportes antigos (contactar os nossos Serviços Técnicos para avaliação da sua aplicabilidade a cada caso).
- No fabrico de blocos e outros artefactos de construção.
- No tratamento de solos, para melhoria das características mecânicas e trabalhabilidade.
- Como substituto do *filler* nos pavimentos betuminosos.

3. Características do produto:

	Valores médios ano 2004	Norma de Referência
Água Livre	0,8 %	EN 459-1
Início de Presa	2 horas	
Fim de Presa	7 horas	
Sulfatos	2,6 %	
Cal livre	4,0 %	
Finura:		EN 459-1
90 µm	13 %	
200 µm	2 %	
Compressão:		EN 459-1
- aos 7 dias	4 MPa	
- aos 28 dias	7 MPa	

4. Fabricação de argamassas:

A dosagem de *Cal Hidráulica Martingança* numa argamassa deve adequar-se ao fim a que se destina. Nas argamassas de reboco e de assentamento, a *Cal Hidráulica Martingança* substitui com vantagem a utilização de saibros (normalmente com teores de argila muito elevados e, por isso, nocivos, pois provocam fissuração e diminuem a resistência à compressão).

Misturar previamente a *Cal Hidráulica Martingança* com o agregado e posteriormente adicionar água na quantidade necessária para obtenção de uma boa trabalhabilidade.

Como valor orientativo, usar uma relação água/ligante de 1:2 (expressa em volume).

Para efeitos orientativos, relativamente ao traço a utilizar, aconselhamos a consulta das Tabelas Técnicas, de Brazão Farinha e Correia dos Reis.

Condicionantes

Não aplicar argamassas a temperaturas inferiores a 5°C e superiores a 30°C, evitando a aplicação em situações de elevada exposição solar e/ou sob ventos fortes.

Não utilizar argamassas *amolentadas* ou que tenham iniciado a sua presa.

Evitar a secagem rápida das argamassas, regando o suporte 1 a 2 horas antes da aplicação e voltando a regar logo que a argamassa se apresente suficientemente resistente. Repetir a rega 1, 2 e 7 dias depois.

Conselhos complementares

O excesso de água da amassadura é prejudicial às características físicas do reboco. Deve ser sempre utilizada a quantidade mínima de água que permita boa trabalhabilidade.

A água de amassadura deve estar isenta de quaisquer impurezas (argilas, matéria orgânica), devendo - de preferência - ser utilizada água potável.

Uma vez determinado o traço a utilizar para uma argamassa, manter as dosagens constantes e o tempo de amassadura.

5. Tratamento de Solos

A adição de *Cal Hidráulica Martingança* a certos solos argilosos e húmidos permite a sua estabilização, melhorando a sua resistência às intempéries, pela diminuição do índice de plasticidade e de uma maior compactação, a qual permite um aumento do CBR (*California Bearing Ratio*, índice de capacidade de suporte).

A adição de *Cal Hidráulica Martingança*, devido ao seu teor de cal livre, reduz à humidade do solo (poder exccicante), com ele reagindo,

Cal Hidráulica Martingança CE



FICHA TÉCNICA

aglutinando as suas partículas e constituindo um aglomerado muito mais compacto.

Processo de aplicação

A quantidade de *Cal Hidráulica Martingança* a utilizar deve ser de 0,5 a 5% (sendo 3% o valor típico) da massa de solo a tratar, de onde devem ser retiradas as pedras de grandes dimensões.

De seguida, espalhar a *Cal Hidráulica Martingança* misturando-a e homogeneizando-a com o solo em tratamento. Depois, compactar o solo tratado, que ficará muito mais resistente à penetração das águas pluviais e mais apto a funcionar como base de fundações.

6. A *Cal Hidráulica Martingança* como substituto do filler

A adição de *Cal Hidráulica Martingança* aos betuminosos provoca uma generalizada melhoria da qualidade nas características da camada de desgaste, que se traduzem por:

- maior consistência do betuminoso, devido à maior aderência entre este e os agregados;
- maior resistência à penetração das águas, com o conseqüente abrandamento do fenómeno de envelhecimento acelerado;
- maior resistência à fissuração.

7. Higiene e Segurança

Nada a salientar, visto tratar-se de um produto não nocivo, nem inflamável, embora irrite os olhos e a pele; não deve ser ingerido.

Utilizar luvas e máscara no seu manuseamento, lavando bem as mãos no final. No caso de contacto com os olhos, lavá-los abundantemente com água limpa.

Consultar a ficha de segurança do produto em www.secilmartinganca.pt.

8. Transporte, validade e embalagem

A *Cal Hidráulica Martingança* deve ser transportada, manuseada e armazenada dentro da embalagem original (a qual só deve ser aberta para utilização), ao abrigo de humidades e exposição ao calor.

Nestas condições, a *Cal Hidráulica Martingança* poderá ser armazenada pelo período máximo de 6 (seis) meses.

A *Cal Hidráulica Martingança* é fornecida em sacos de 40 kg, em paletes plastificados, ou a granel.

9. Assistência técnica:

Para assistência técnica e informações comerciais contactar

Apartado 2, 2405-999 Maceira LRA, Portugal
Tel: 244 770 220; Fax: 244 777 997
e-mail: comercial@secilmartinganca.pt
www.secilmartinganca.pt



Ano: 03

Norma de referência: NP EN 459-1:2003

Utilização prevista: Preparação de argamassas de alvenaria, de reboco e de emboço e produção de outros produtos de construção

Nome e Endereço do fabricante: SECIL MARTINGANÇA

Apartado 2,
2405-909 Maceira LRA,
Portugal

Produto fabricado pela Secil Martingança, Lda, cujo Sistema de Gestão da Qualidade está certificado pela APCER com o nº 2003/CEP.2132

A informação e os dados técnicos constantes da presente Ficha Técnica exprimem o nosso conhecimento actual, podendo ser alterados sem prévio aviso. A nossa responsabilidade limita-se à garantia de qualidade do produto fornecido, rejeitando quaisquer anomalias resultantes da sua aplicação indevida.

Em situação de dúvida suscitada pelo presente documento, e particularmente em presença de aspectos singulares da construção, solicitamos o contacto com os nossos Serviços Técnicos.

Revisão de Março 2005

TCE017/2

Figura 18 – Ficha técnica de cal hidráulica HL5, Martingança (Secil).

3. CIMENTOS

3.1 INTRODUÇÃO



Em geral são consideradas duas abordagens para classificar cimentos, uma em relação à composição e a outra relativa às propriedades correspondentes ao desempenho dos cimentos (Jackson, 1998).


Na área de construção e engenharia civil tem sobretudo interesse os cimentos hidráulicos calcários - isto é, os cimentos hidráulicos em que os principais constituintes são compostos de cálcio. De facto estes cimentos são constituídos sobretudo por silicatos e aluminatos de cálcio e de um modo geral podem-se classificar em:

- cimentos naturais
- cimentos Portland
- cimentos aluminosos (high-alumina) (Neville, 1995).


Muitos países da Europa tais como Áustria, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Islândia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Holanda, Noruega, Espanha, Suécia, Suíça, Reino Unido e Portugal tem desenvolvido normas relativas aos cimentos, de que se destacam algumas:

CIMENTOS CORRENTES:


- ⇒ EN 197 - 1 (June 2000) Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. *(Harmonizada)*
Amendment EN 197-1:2000/A1:2004 *(Inclui na EN 197-1 os cimentos correntes de baixo calor de hidratação)*
Amendment EN197-1:2000/prA2:2006 *(Inclui na En 197-1 os cimentos correntes resistentes aos sulfatos)*
- ⇒  **NP EN 197-1 (2001) Cimentos – Part 1: Composição, especificações e critérios de conformidade.** *(Harmonizada)*
Aditamento NP EN 197-1:2000/A1:2005 *(Inclui os cimentos correntes de baixo calor de hidratação)*
- ⇒ EN 197 - 2 (June 2000) Cement - Part 2: Conformity evaluation.
- ⇒  **NP EN 197-2 (2001) Cimentos – Part 2: Critérios de conformidade.**
- ⇒ EN 197 -4 (April 2004) Cement - Part 4: Composition, specifications and conformity criteria for low early strength blastfurnace cements. *(Harmonizada)*

⇒  **NP EN 197-4 (2005) Cimento. Parte 4: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos de alto-forno de baixas resistências iniciais** (*Harmonizada*)

Em Portugal tem interesse referir ainda, uma norma relativa ao cimento branco e uma outra sobre as condições de fornecimento e recepção de cimentos:

⇒  **NP 4326 (1996) Cimentos brancos. Composição, tipos, características e verificação da conformidade.** Note-se que as normas europeias consideram os cimentos brancos como correntes e portanto incluídos na EN 197.

⇒  **NP 4435 (2004) Cimentos. Condições de fornecimento e recepção.**

 A ASTM - American Society for Testing and Materials também tem contribuído largamente para a classificação dos cimentos sobretudo através das normas:

C 150 - 95 - Standard Specification for Portland Cement

C 595 M - 95 - Standard Specification for Blended Hydraulic Cements.

CIMENTO DE ALVENARIA:


⇒ EN 413 – 1 (2004) Masonry cements–Part 1: Specifications. (*Harmonizada*)

⇒  **NP EN 413-1 (2005) Cimento de alvenaria. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade.** (*Harmonizada*)

⇒ prEN 413-2 (2005). Masonry cements-Part 2: Test methods

CIMENTO ESPECIAIS:

⇒ EN 14216 (2004).Cement – Composition, specifications and conformity criteria for very low heat special cements. (*Harmonizada*)

⇒  **NP EN 14216 (2005) Cimento - Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos especiais de muito baixo calor de hidratação.** (*Harmonizada*)

OUTROS LIGANTES:

Note-se que existem normas referentes a outros ligantes hidráulicos como, por exemplo, os ligantes hidráulicos para construção rodoviária constituídos por misturas produzidas em fábrica e prontas a usar por adição com água (EN 13282) ou, outro caso, como os ligantes hidráulicos para construção (HBC) que contêm pelo menos 20% de clínquer Portland e também cal utilizados, por exemplo, em argamassas para alvenaria não estrutural (EN 15368).

3.2 DEFINIÇÃO

Segundo a normalização europeia (EN 197 - 1):

CIMENTO é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água forma uma pasta que ganha presa e endurece por reacções e processos de hidratação e que, depois de endurecida, conserva a sua capacidade resistente e estabilidade mesmo debaixo de água.

Um cimento que esteja de acordo com esta norma europeia é designado por cimento CEM e se for devidamente misturado com água e agregados, é possível obter-se betão ou argamassa:

- que conserva trabalhabilidade adequada durante um período de tempo suficiente**
- que, a determinadas idades atinge níveis de resistência especificados**
- e que apresenta estabilidade volumétrica a longo prazo.**

O endurecimento de cimentos CEM é sobretudo devido à hidratação de SILICATOS de CÁLCIO embora outros compostos, tais como os ALUMINATOS, possam intervir no endurecimento. Nestes cimentos, a soma da quantidade de ÓXIDO de CÁLCIO reactivo (CaO) e SILICA reactiva (SiO₂), em massa, é pelo menos 50% (NP EN 197-1). Fisicamente são constituídos por pequenos grãos de materiais diferentes mas a composição é estatisticamente homogénea. A uniformidade relativa a todas as propriedades destes cimentos é obtida por processos contínuos de produção em massa que incluem moagem e homogeneização adequadas. A qualidade do produto final nas fábricas modernas de cimentos CEM é conseguida por pessoal especializado e qualificado e laboratórios adequadamente equipados que contribuem para o controlo e ajuste contínuo nas linhas de produção. Isto é, o processo de fabrico e o controlo de qualidade asseguram portanto que os cimentos apresentem uma composição dentro dos limites fixados pelas normas europeias (Jackson, 1998).

3.3 COMPOSIÇÃO DA MATÉRIA PRIMA

O cimento Portland artificial é obtido a partir de uma mistura devidamente proporcionada de calcário ou cré (carbonato de cálcio), argila ou xisto argiloso (silicatos

de alumínio e ferro) ou a partir de margas ou calcários margosos (margas - mistura de materiais calcários e argilosos) e, eventualmente, outra ou outras substâncias apropriadas ricas em sílica, alumina ou ferro, reduzida a pó muito fino, que se sujeita à acção de temperaturas da ordem de 1450°C, obtidas geralmente em grandes fornos rotativos. A mistura é muito bem homogeneizada e bem dispersa, quer a seco (fabricação do cimento por via seca) quer por meio de água (fabricação por via húmida).

Àquelas temperaturas as matérias - primas reagem entre si, no que são ajudadas pela fase líquida obtida pela fusão de cerca de 20% da matéria – prima (clínquerização), originando novos compostos. Em virtude destes fenómenos químicos e físicos, os produtos da reacção, ao arrefecerem, aglomeram-se em pedaços com dimensões variáveis mas geralmente entre 2 mm e 20 mm, chamados clínquer (Sousa Coutinho, 1988, Neville, 1995). Os duros nódulos de clínquer são depois arrefecidos e moídos simultaneamente com uma pequena percentagem de gesso até se obter uma granulometria muito fina.

Assim, a definição de cimento Portland nas várias normas dos diferentes países é considerada, nestes termos, reconhecendo que o gesso é adicionado após a calcinação (Neville, 1995). Hoje em dia outros materiais podem ser adicionados em diferentes proporções quer nos Centros de Produção de Cimento (originando cimentos de várias designações como o cimento Portland composto, cimento de alto forno, etc.) quer na amassadura do próprio betão.

3.4 FABRICO

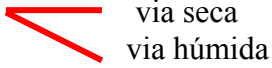
3.4.1 Considerações Gerais

Como cerca de 70 a 80% da matéria - prima é calcário em geral uma fábrica de cimento situa-se junto de uma formação calcária.

As fases de fabrico são as seguintes:

1. Preparação do cru

- extracção do calcário (1,5 a 2 m)
- britagem (cm)
- pré-homogeneização - formação de pilha de armazenamento com argila e remoção por cortes verticais ($\pm 75\%$ brita calcária + $\pm 25\%$ argila).

- moagem e homogeneização 
 - via seca
 - via húmida
- correcção com aditivos (calcário, sílica, ferro ou alumina)

2. Cozedura

- armazenamento nos silos alimentadores do forno
- pré-aquecimento
- entrada no forno rotativo

3. Arrefecimento, adição de gesso e moagem

4. Ensilagem e Ensacagem

Descreve-se em seguida cada uma destas fases.

3.4.2 Preparação do cru

A pedreira é explorada em grandes massas: blocos com dimensão máxima de 1,5 a 2 m são extraídos e transportados para um britador que os reduz a pequenos blocos com alguns centímetros.

O material britado é transportado para uma pilha de armazenamento ao mesmo tempo que recebe já a adição da argila (sensivelmente 25% de argila e 75% de brita calcária). Enquanto a mistura é depositada em camadas horizontais, a sua remoção para os silos alimentadores dos moinhos de bolas é feita por meio de cortes verticais na pilha de armazenamento. Estes procedimentos consistem na Pré-homogeneização.

Há dois processos de fabrico do cimento: um em que a matéria prima é moída e homogeneizada dentro de água (via húmida) e outro em que a moedura e homogeneização se realizam a seco (via seca).

A primeira é a mais antiga e a mais eficaz para obter homogeneização de materiais sólidos. Hoje está caindo em desuso pois requer maior consumo de energia, por ser necessário eliminar a água do cru, por aquecimento. Devido à actual crise de energia está sendo substituída por via seca que se tornou possível graças às técnicas de fluidificação gasosa.

As reacções químicas promovidas pela acção da temperatura entre os componentes da matéria - prima são essencialmente reacções no estado sólido.

Para activar as reacções entre fases sólidas, devido à lenta difusão dos átomos e moléculas nos sólidos, é necessário elevar a temperatura e a área das superfícies dos reagentes. A velocidade da reacção entre fases sólidas é portanto função do grau de finura, da natureza química dos materiais e da duração do aquecimento.

As reacções em fase líquida são muito mais rápidas e os produtos da reacção só dependem da temperatura e da composição química das fases líquidas.

Daqui resulta a importância da preparação das matérias - primas para o cimento: finura da moagem, homogeneidade e proporção da fase líquida à temperatura de cozedura (cerca de 20%).

A matéria - prima depois de moída é levada a silos ou tanques de homogeneização (respectivamente na via seca e na húmida) onde é sujeita a análise química - hoje automática e instantânea, por meio dos raios X, com ligação a um computador que calcula as correcções a fazer e comanda os silos de aditivos, correctores, em calcário, sílica, ferro ou alumina (ver 3.5).

Após esta correcção, o cru entra para os silos alimentadores do forno (adaptado de Coutinho, 1988).

3.4.3 Cozedura em forno rotativo

Antigamente - e ainda hoje (no estrangeiro) nas fábricas de pequena produção (Até 500 t/dia) - o forno é vertical (shaft kilns) mas após a invenção do forno rotativo este tem sido usado cada vez mais, com uma produção até 8000 t/dia e um produto final mais homogéneo (Coutinho, 1988; Jackson, 1998).

O forno rotativo, constituído por um cilindro de chapa de aço com diâmetro que pode atingir 7,6 m e comprimento até 232 m (Alhandra) é revestido inteiramente com material refractário. O cilindro assenta sobre roletes que o fazem girar e tem uma inclinação de 2 a 6%. O movimento de rotação (1 – 3.5 rotações/min.) e a inclinação provocam o avanço dos materiais no interior do forno. No extremo inferior introduz-se o combustível e o respectivo ar comburento, depois de ter sido aquecido no arrefecedor do clínquer.

Para obter a temperatura de clinquerização, temperatura de fusão das fases aluminatos e ferratos, é necessário recorrer à combustão de carvão ou de fuel - oil. Na

década de 50 o carvão foi sendo gradualmente substituído pelo fuel, de tal modo que, por volta de 1970, os fornos eram aquecidos somente a fuel. A partir de 1973, com o início da crise do petróleo começou-se a voltar de novo ao carvão, ou pelo menos a empregar sistemas mistos de queima de carvão com fuel e a partir dos anos oitenta usa-se sobretudo carvão e coque de petróleo e também gás natural (Coutinho, 1988, Jackson, 1998).

O carvão seco é reduzido a pó e injectado na parte inferior do forno com uma parte do ar (ar primário); o restante ar comburente (ar secundário) é introduzido no forno depois de ter sido aquecido no arrefecedor do clínquer (Coutinho, 1988).

É possível utilizar resíduos como combustível, de forma limpa e eficaz em termos ambientais, como demonstrado em experiências efectuadas em vários pontos do mundo com diferentes produtos, tais como pneus usados, lixos domésticos e sedimentos de efluentes de esgoto (BCA, 1992).

Quando se queima carvão há que ter em conta a composição química das suas cinzas, que vão modificar a do cru; a composição deste é portanto calculada para receber a sílica, alumina, ferro, etc., que as cinzas eventualmente possuem. O fuel - oil contém geralmente enxofre, assim como diversos carvões com altos teores de enxofre e é este elemento, vai introduzir sulfuretos e especialmente sulfatos, no cimento. (Coutinho, 1988; BCA, 1992). Em termos ambientais os carvões com altos teores de enxofre não provocam emissões poluentes pois o enxofre fica retido no clínquer (BCA, 1992; Neville, 1995).

Para se alcançar a temperatura de clinquerização (1400 - 1450°C) é necessário obter uma chama com temperatura da ordem de 1700°C.

Em termos de consumo de carvão utilizam-se cerca de 220 kg para produção de 1 tonelada de cimento e quando se utilizava fuel-oil, que caiu em desuso nos anos oitenta, eram necessários cerca de 125 litros (Neville, 1995).

A alimentação do forno pode ser realizada de quatro formas: pela entrada directa da farinha (via seca), da pasta de cru (via húmida 35 a 50% de água), da farinha humedecida com água, até 13%, aglomerado em grânulos (via semi-seca) e em pasta dissecada por meio de uma compressão e filtragem (via semi-húmida que reduz a humidade a menos de 20%).

O forno rotativo é adaptado a estes estados da matéria prima, e a sua construção visa sempre o aproveitamento do calor transportado nos fumos provenientes da cozedura ou clinquerização, para secar a aquecer a matéria - prima a caminho da cozedura.

Assim, a clinquerização em via húmida emprega fornos rotativos longos, (230 m) equipados com por exemplo, grinaldas de cadeias internas, (correntes que absorvem o calor dos gases em movimento, e o transmitem por condução para a pasta) com o fim de reaproveitar energia e demorar o mais possível a progressão da pasta, obrigando-a primeiro a secar; a cozedura em via semi-húmida utiliza fornos mais curtos e precedidos de pré-aquecedores verticais, horizontais (tambores rotativos), etc., onde o teor de água da pasta desce para 10 a 15% (Coutinho, 1988, Jackson, 1998).

Na via semi-seca empregam-se secadores de grelha móvel, onde os grânulos de cru (de farinha humedecida com água), aglomerados, se depositam e através dos quais circulam os gases quentes de combustão.

Finalmente, na via seca empregam-se hoje nas fábricas de maior produção, pré-aquecedores de ciclones que foi talvez o maior desenvolvimento, em termos de redução de consumo de energia na produção do cimento, dos quais o mais importante é o Dopol - Figura 19 (Coutinho, 1988; Jackson, 1998).

Os gases provenientes do forno são aspirados, entrando pela parte inferior, enquanto o cru entra pela parte superior, descendo através dos ciclones, onde os gases provocam a sua agitação e dispersão, até entrar no forno.

A permuta de calor neste sistema é então obtida por **fluidificação** do cru no seio dos gases quentes, de modo que cada partícula fica em contacto com os gases, adquirindo a sua temperatura em uma fracção de segundo. Os gases saem a cerca de 50 a 70°C (temperatura a que vai entrar a matéria prima) e o cru sai do recuperador entrando no forno a cerca de 800 a 900°C. Com estes pré-aquecedores consegue-se recuperar cerca de 82% do calor dos gases de combustão que saem do forno. O **inconveniente** deste sistema é, como veremos mais à frente, o enriquecimento do clínquer em álcalis e sulfatos (Coutinho, 1988).

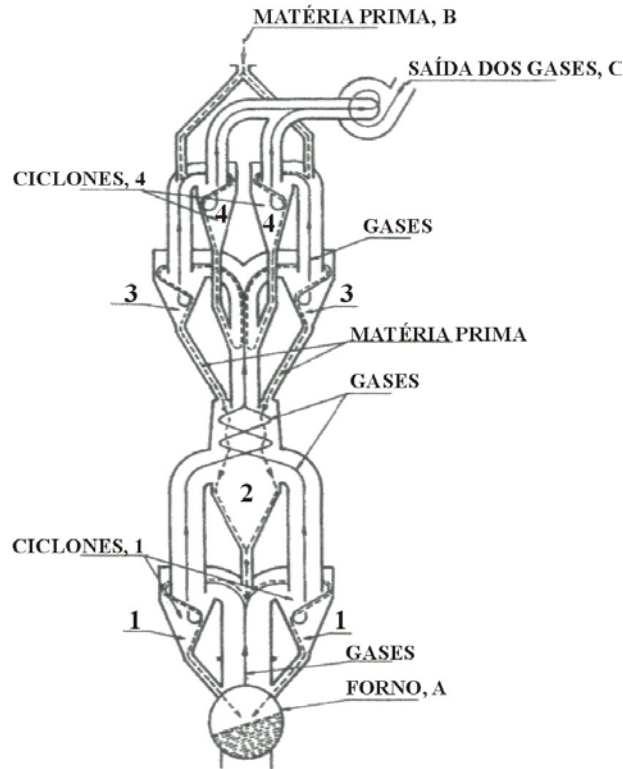


Figura 19 - Esquema de um pré-aquecedor Dopol. Os gases quentes provenientes do forno, A, são aspirados saindo por C, para captação e aproveitamento do pó. A alimentação do cru é feita em B; este desce até aos dois primeiros ciclones paralelos, 4, depois aos outros dois, 3, entrando em seguida na câmara de recolha, 2 donde passa para os dois primeiros ciclones paralelos, 1 (Coutinho,1988).

Na Figura 20 vê-se a fotografia de parte do forno e parte da Torre de Ciclones numa fábrica de produção de cimentos em Portugal.

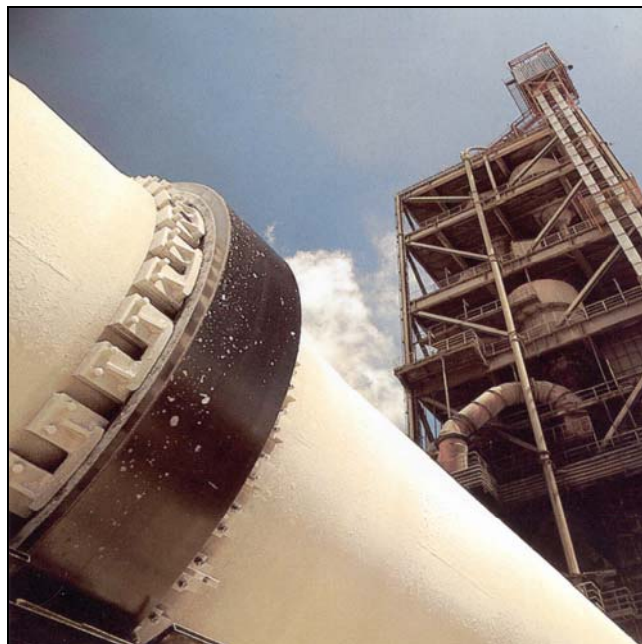


Figura 20 – Parte do forno e parte de Torre de Ciclones (Cimpor).

3.4.4 Arrefecimento do clínquer. Moagem

À saída do forno o clínquer deve ser arrefecido rapidamente, pois o silicato tricálcico é instável a temperaturas inferiores a 1250°C; há portanto que conservar a sua estrutura, arrefecendo-o rapidamente desde temperaturas superiores àquela até à ambiente.

O silicato bicálcico apresenta as formas β e γ ; a forma β é estável desde a temperatura de formação (1200°C) até 675°C. Abaixo desta temperatura o silicato bicálcico β transforma-se em γ , forma em que é praticamente inerte. Por isso também é necessário evitar a formação do silicato bicálcico γ , arrefecendo rapidamente o silicato desde 1200°C até à temperatura ambiente.

Há também toda a vantagem em evitar que a fase líquida cristalize pois a reactividade do aluminato de cálcio diminui e o óxido de magnésio poderá cristalizar em grandes cristais (periclase), o que provoca a instabilidade e a expansibilidade do volume da pasta de cimento endurecido (ver 3.7.6.2).

Para efectuar o arrefecimento, há diferentes dispositivos dos quais o mais corrente é o *planetário* constituído por vários tubos arrefecedores que envolvem o forno. O clínquer é arrefecido pelo ar (comburente) que em contracorrente o atravessa, chegando quente à zona de combustão.

Após a saída do arrefecedor, a cerca de 125-180°C o clínquer é armazenado, terminando o seu arrefecimento com aspecto negro e duro – Figura 21, entrando depois nos moinhos de bolas, onde é moído, juntamente com adjuvantes, para facilitar a moagem, com aditivos – gesso (3 a 5%) – para lhe regular o tempo de presa, e outros, para lhe modificar as propriedades como a pozolana, a escória de alto-forno, etc. (Coutinho, 1988; Neville, 1998).

Modernamente, e ainda como resultado da crise energética e por razões ambientais, os aditivos podem ser inertes, em proporção tal que não comprometam as propriedades do cimento (em geral até 10 ou 15%).

A moagem efectua-se em moinho de bolas idêntico aos da preparação do cru, numa operação que consome cerca de 40% da energia total do fabrico do cimento. A característica que se obtém, a **finura**, é tão importante **como a composição química**.



Figura 21 – Clínquer à saída do arrefecedor.

Os elementos finos produzidos por moagem tendem a diminuir muito rapidamente o rendimento desta operação. O aparecimento de elementos finos, embora desejado, aumenta a compacidade da mistura do clínquer com as bolas, diminuindo a eficácia destas. É por isso necessário eliminá-los o mais rapidamente possível, à medida que se vão formando. Para a solução deste caso há dois tipos de moedura: em **circuito aberto** e em **circuito fechado** (Coutinho, 1988).

Na moagem em circuito aberto o clínquer, juntamente com o gesso, é introduzido no moinho que tem três compartimentos com bolas de aço de diâmetro sucessivamente menor, desde 60 a 80 mm no primeiro compartimento (em 1/6 do comprimento do moinho) passando por um compartimento intermédio com bolas de 30 a 50 mm até diâmetros de 15 a 25 mm no último (com metade do comprimento); actualmente, no último compartimento usam-se corpos moentes cilíndricos (cylpebs) em vez de bolas, com 4 a 8 mm de diâmetro (Coutinho, 1988).

Na moagem em circuito fechado, os finos vão sendo extraídos do moinho à medida que se vão produzindo. Uma corrente de ar atravessa o moinho, da entrada para a saída, arrastando as partículas mais finas, para um separador, onde são classificadas:

as finas vão para os silos de armazenamento, e as mais grossas voltam ao moinho (Coutinho, 1988).

Para ajudar a moagem usam-se adjuvantes que se adicionam ao clínquer durante esta operação promovendo a dispersão das partículas de cimento: 0,01 a 0,1% da massa do clínquer em aminas ou sais de aminas, poliois, linhossulfitos ou ácidos orgânicos fracos que não são decompostos às temperaturas de moagem. Estes adjuvantes diminuem o consumo de energia de 10% a 15% e não têm qualquer acção sobre a qualidade do cimento. Evitam o revestimento das bolas, das paredes do moinho e a formação de agregados de partículas grossas com finas, aumentando o rendimento do separador de fluxo de ar (Coutinho, 1988).

Dos moinhos de bolas, o cimento passa para grandes silos, onde é homogeneizado e daí distribuído, a granel ou em sacos (Coutinho, 1988).

A Figura 22 - representa o diagrama de produção (via seca) numa central moderna.

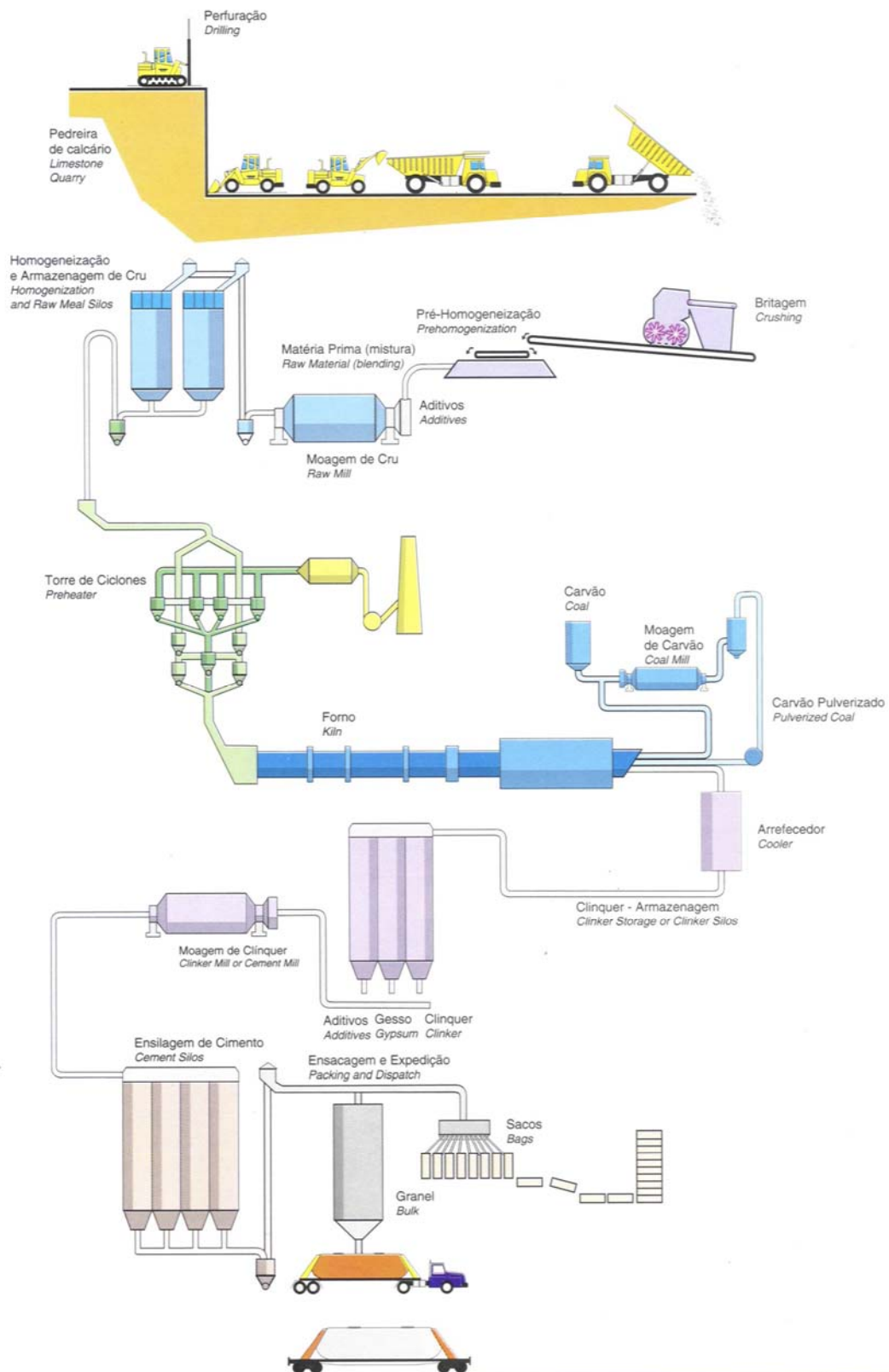


Figura 22 – Produção de cimento (via seca) (Cimpor)

3.5 PRINCIPAIS COMPONENTES DO CRÚ E DO CLÍNQUER PORTLAND

3.5.1 Considerações gerais

Os componentes da matéria prima sujeitos à acção da temperatura vão sofrendo uma série de reacções químicas e vão-se transformando em compostos diversos como esquematizado no diagrama da Figura 23 (Jackson, 1998).

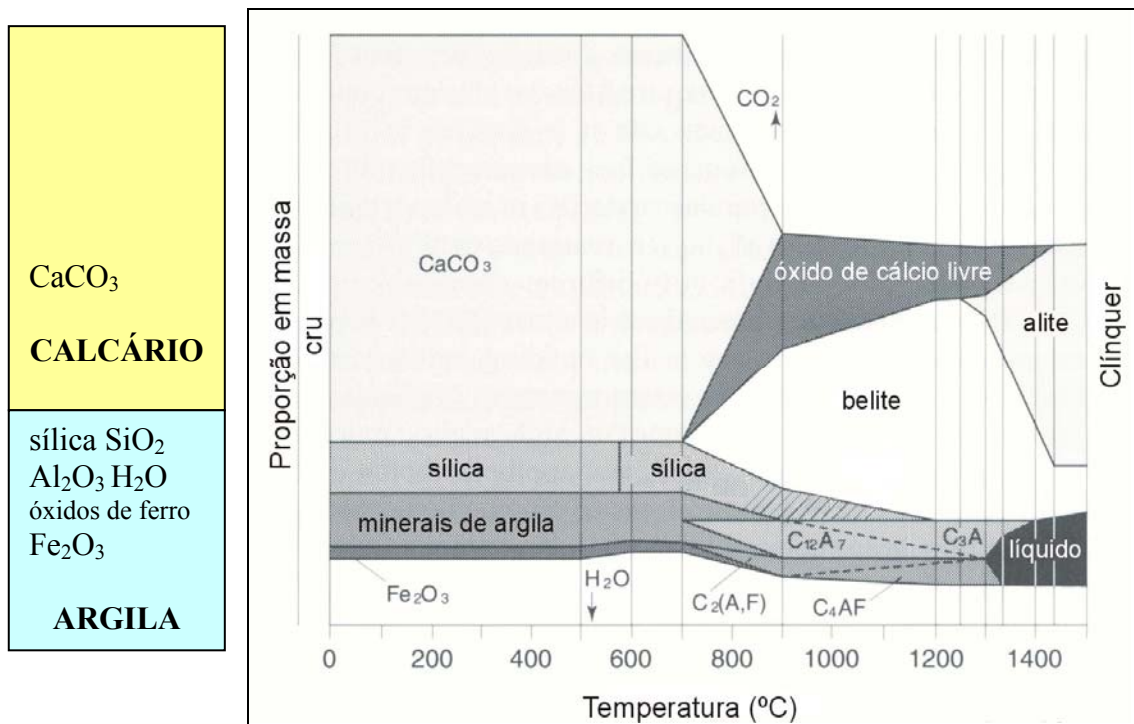


Figura 23 – Esquema das transformações sofridas pelo cru até se transformar em clínquer (Jackson, 1998).

3.5.2 Componentes da matéria prima

Neste diagrama tem-se à esquerda a composição da matéria prima obtida pela mistura devidamente doseada de calcário e argila que compreende:

Calcite	CaCO ₃
Sílica	SiO ₂
Minerais de argila	SiO ₂ – Al ₂ O ₃ – H ₂ O
Óxidos de ferro	Fe ₂ O ₃

A composição da matéria prima deve ser tal que depois de perder a água e o dióxido de carbono devido à elevada temperatura atingida no forno, tenha uma composição química dentro dos limites seguintes:

CaO - 60 a 67%

SiO ₂	-	17 a 25%
Al ₂ O ₃	-	3 a 8%
Fe ₂ O ₃	-	0.5 a 6%

Além destes componentes principais, a matéria-prima contém ainda metais alcalinos, magnésio, magnésio, titânio, fósforo e, eventualmente, sulfatos:

MgO	-	0.5 a 4%
K ₂ O e Na ₂ O	-	0.3 a 1.2%
SO ₃	-	2 – 3.5%

(Coutinho, 1988 ; Neville, 1995 ; Jackson, 1998).

3.5.3 Notação abreviada

Note-se que é costume na Química do cimento, considerar a notação abreviada seguinte:

CaO	-	<i>C</i>
SiO ₂	-	<i>S</i>
Al ₂ O ₃	-	<i>A</i>
Fe ₂ O ₃	-	<i>F</i>

No que respeita ao cimento hidratado são usados também os seguintes símbolos:

H ₂ O	-	<i>H</i>
SO ₃	-	\bar{S}

3.5.4 Módulos

Com o fim de obter produtos com a necessária regularidade de composição e portanto de propriedades, é preciso que entre estes simples óxidos elementares existam certas relações antes da cozedura, denominadas módulos (*Nota 1*), dos quais o hidráulico foi pela primeira vez definido por Vicat:

Módulo hidráulico (VICAT)

$$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \text{ de } 1,7 \text{ a } 2,3$$

Depois deste, outros se têm calculado, e hoje é costume considerar mais os seguintes:

Módulo silícico

$$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \text{ de } 2 \text{ a } 3$$

Quanto mais baixo for este módulo mais baixo será a temperatura de clinquerização, pois Al_2O_3 e Fe_2O_3 são fundentes.

Módulo alumino-férrico ou de fundentes

$$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \text{ de } 1,5 \text{ a } 2,5$$

Grau de saturação em cálcio

$$\frac{\text{CaO}}{2,8\text{SiO}_2 + 1,18\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65\text{Fe}_2\text{O}_3} \text{ de } 0,90 \text{ a } 0,98$$

Este último módulo representa a relação entre o óxido de cálcio total e o que é susceptível de se combinar com sílica, alumina e ferro para dar os componentes indicados mais adiante.

À alumina e aos óxidos de ferro chamam-se *fundentes*, pois os compostos em que intervêm fundem à temperatura mais elevada (denominada temperatura de clinquerização) ajudando assim à melhor combinação de todos os intervenientes nas reacções em que se formam os componentes do cimento.

O Módulo de fundentes é particularmente importante na obtenção de cimentos com resistência química melhorada e calor de hidratação baixo. Para este efeito é necessário que não se forme aluminato tricálcico ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$) o que acontece quando o número de moléculas de sesquióxido de ferro é igual ou maior do que o número de moléculas de óxido de alumínio (Coutinho, 1988).

$$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \leq 0,64$$

Se os módulos não respeitarem os limites apresentados, é necessário fazer correcções à matéria prima depois de moída e antes de entrar para os silos alimentadores do forno. Como foi dito anteriormente, (3.4.2) a matéria prima depois de moída, é sujeita a análise química automática por raios X. Esta informação é automaticamente processada pelo sistema informático instalado e as correcções a fazer, isto é, as quantidades necessárias de calcário, sílica, ferro e/ou alumina são adicionadas automaticamente a partir dos silos respectivos.

Nota 1: Nas fórmulas dos módulos, os símbolos referem-se às percentagens dos óxidos na totalidade do cimento e não aos seus pesos moleculares.

3.5.5 Componentes principais do clínquer

As reacções químicas que ocorrem pela acção da temperatura, a partir da matéria prima constituída principalmente por cal, sílica, alumina e óxidos de ferro levam à formação dos componentes principais do clínquer Portland, os quais cristalizam em elementos mais ou menos individualizados, enumerados a seguir, com indicação da percentagem em que normalmente ocorrem nos cimentos Portland:

Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	(de 20 a 65%)	C_3S (alite)
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	(de 10 a 55%)	C_2S (belite)
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	(de 0 a 15%)	C_3A (aparece c/ mat. vítrea)
Aluminoferrato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	(de 5 a 15%)	C_4AF (celite)

Esquemáticamente podem-se resumir assim as transformações sofridas pelas matérias primas pela acção da temperatura até à obtenção do clínquer:

Até 100°C evapora-se a água livre, secando a mistura de calcário e argila.

Até 450°C sai a água adsorvida nos componentes da matéria prima.

Até 700°C dá-se a activação dos silicatos por desidratação e alterações na rede cristalina.

De 700 a 900°C dá-se a decomposição dos carbonatos de cálcio (e de magnésio) com a formação de óxido de cálcio (e de magnésio).

Começa a combinação da alumina, óxidos de ferro e sílica activada com o óxido de cálcio. Inicia-se a formação de belite (silicato bicálcico ← sílica + cal) e a formação de aluminato de cálcio $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ ($C_{12}A_7$ ← alumina + cal) e aluminoferrato bicálcico (C_2AF).

De 900 a 1200°C prossegue em pleno a formação de belite (silicato bicálcico), começa-se a formar o aluminato tricálcico (C_3A) e o aluminoferrato tetracálcico (C_4AF). De facto, a cerca de 1200°C a maior parte do aluminato tricálcico e aluminoferrato tetracálcico está constituído e o teor de silicato bicálcico (belite) atinge o máximo.

A 1260°C principia o aparecimento da fase líquida, constituída pela combinação de parte de óxido de cálcio com os óxidos de alumínio e de ferro, a qual promove a constituição do silicato tricálcico (alite), a partir do silicato bicálcico (belite) já formado. Mas parte do silicato bicálcico subsiste pois este não se pode transformar em tricálcico sem que haja ainda algum óxido de cálcio livre. Ver-se-á que este óxido de cálcio (livre)

pode ser nocivo porque a sua hidratação se dá com expansão, a qual se pode tornar perigosa quando o seu teor exceda 2% e se encontre cristalizado (Coutinho, 1988).

Durante o arrefecimento a fase fundida não deve cristalizar. Se o arrefecimento for lento o C_3A cristaliza e o óxido de magnésio poderá formar grandes cristais. No diagrama da Figura 23 não está representado o que se passa com os sulfatos alcalinos, que se individualizam durante o processo de arrefecimento (Jackson, 1998; Coutinho, 1988).

Na realidade os componentes do clínquer do cimento não são tão simples como indicado anteriormente pois não aparecem puros: a sua rede cristalina contém outros metais, como os alcalinos, o ferro, o magnésio, etc. De facto, na sua estrutura, há átomos de cálcio que são substituídos por magnésio e pelos metais alcalinos, átomos de silício e de alumínio que são substituídos por átomos de ferro, etc. Existem no clínquer óxidos livres e outros componentes em solução sólida com estes e tudo isto cria influências recíprocas muito importantes na composição e estrutura de tais componentes (Coutinho, 1988).

Le Châtelier foi dos primeiros a reconhecer que a análise química do clínquer pouco diria sobre a natureza dos componentes formados durante a fusão e a sua cristalização subsequente. Em 1882, observando ao microscópio, por transparência, secções delgadas do clínquer, descreveu os principais cristais que o compõem, bem como a massa vítrea isotrópica que os rodeava e cerca de quinze anos depois o sueco **Törnebohm** sem conhecer o trabalho de Le Châtelier, descrevia os mesmos minerais, tendo designado os principais por *alite*, *belite* e *celite*.

A *alite* é essencialmente constituída pelo silicato tricálcico com diferentes átomos estranhos, como o Mg, Al, Fe. Os cristais de alite são poligonais, de estrutura romboédrica, rectangulares ou hexagonais, com dimensões de 10 a 50 μm .

A *belite* é constituída essencialmente por silicato bicálcico β , com átomos estranhos, como o potássio, o fósforo, o bário, etc. Os cristais apresentam maclas lisas ou estriadas; a sua dimensão é da ordem de 30 μm . Os grãos não têm forma cristalina definida, são arredondados, amarelados, mais ou menos escuros.

A *celite*, que ocorre entre os cristais de alite e belite, reconhece-se pela sua cor amarelo-alaranjada, é constituída por soluções sólidas entre um ferrato bicálcico e um

aluminato bicálcico e na qual o **aluminoferrato tetracálcico (C_4AF)** é um ponto de especial importância. A esta solução sólida chama-se **fase ferrítica** (Coutinho, 1988). O conteúdo médio de celite nos cimentos Portland é cerca de 8% e é a celite (contém ferro) que é responsável pela sua cor cinzenta pelo que o cimento branco não contém celite (Soroka, 1993).

Existe também, entre outros, um material sem cor, como o vidro e que também aparece como material de enchimento entre os grãos de alite e de belite, constituído por aluminatos – **aluminato tricálcico (C_3A)** e por uma **massa vítrea** (Coutinho, 1988).

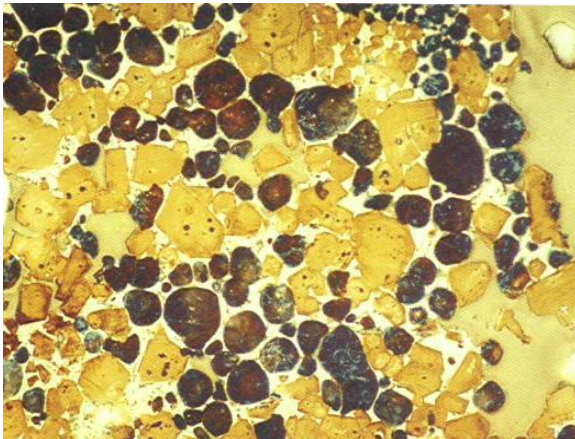


Figura 24 (Glasser, 1998) – Estrutura de um clínquer Portland relativamente comum observado ao microscópio óptico:

alite (silicato tricálcio) – cristais amarelados, de forma aproximadamente hexagonal.

belite (essencialmente silicato bicálcico) – cristais mais escuros, arredondados.

A fase intersticial (celite, massa vítrea etc.) a temperaturas elevadas era material fundido encontrando-se agora cristalizado numa mistura de soluções sólidas entre ferrato de cálcio e aluminato de cálcio, que inclui o aluminoferrato tetracálcico (C_4AF). (As manchas irregulares são resina de preparação para observação)(Coutinho, 1988; Glasser 1998).

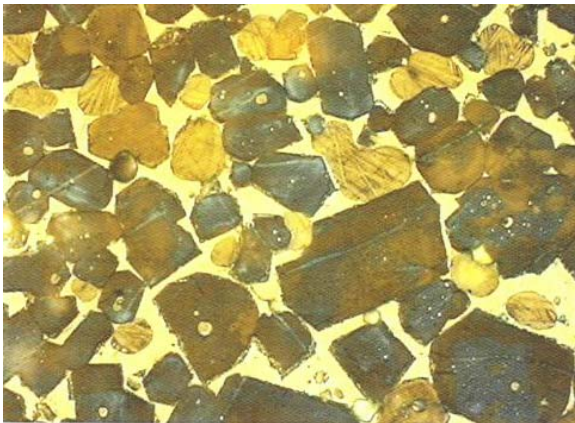


Figura 25 – Estrutura de um clínquer Portland idêntico ao anterior:

alite – cristais escuros azulados (com inclusões de belite)

belite – cristais arredondados, muitos em forma de maclas (Glasser, 1998).

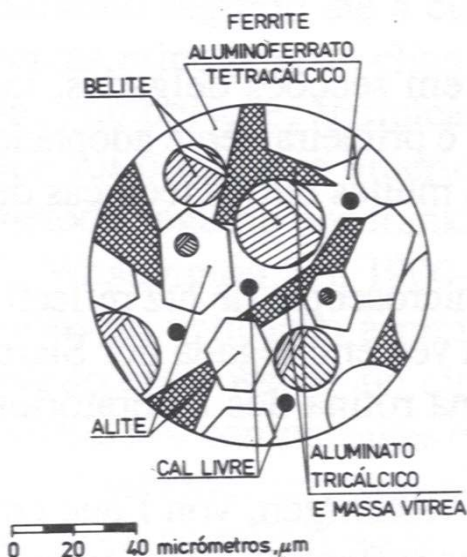


Figura 26 – Aspecto esquemático dos principais componentes do clínquer de cimento Portland: cristais poligonais de alite com pequenas inclusões de belite, cristais arredondados de belite com estriação característica, e fase intersticial de aluminato, ferrite e massa vítrea (Coutinho, 1988).

As propriedades do cimento são dominadas pela natureza da estrutura do clínquer, a qual se pode dizer que varia de cimento para cimento devido às diferenças nas matérias-primas e no modo de fabrico.

Com efeito, é importante voltar a assinalar que a formação do clínquer resulta de reacções no estado semi-sólido: apenas **cerca de 20% da matéria-prima funde**, e os outros 80% reagem no estado sólido. Por isso, enquanto os materiais obtidos inteiramente por fusão, como o ferro fundido, o aço, etc., não são influenciados pelo seu antigo estado, o mesmo não acontece com o clínquer, pois, porque não passou totalmente pelo estado fluído, a cristalização e sobretudo os defeitos da cristalização são influenciados pela constituição cristalográfica do calcário e da argila primitivos. Portanto os clínqueres, mesmo com composições químicas idênticas, podem ter características diferentes, segundo a natureza do material na pedreira de origem.

Acresce ainda que factores como a história térmica do clínquer (tanto dentro do forno como durante o arrefecimento), as dimensões e forma das partículas que compõem o cru, as variações acidentais da composição química do cru – tanto devidas a erros acidentais da dosagem como da natureza e concentração de impurezas tais como magnésio, compostos de flúor, fosfatos, óxidos de chumbo e zinco, álcalis e sulfuretos – contribuem para alterar a estrutura do clínquer. Daqui resulta a enorme **variabilidade nas propriedades do cimento** que não pode ser explicada apenas pela análise química (Coutinho, 1988).

3.5.6 Cálculo dos componentes principais do cimento Portland

Viu-se portanto que a matéria prima submetida a temperaturas de clinquerização, é transformada em quatro tipos diferentes de compostos cálcicos (C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF) que se encontram, àquelas temperaturas num estado de equilíbrio químico. Ora, o arrefecimento vai afectar o grau de cristalização daqueles compostos e a quantidade de matéria amorfa resultante e portanto o produto arrefecido terá uma composição química diferente. De qualquer modo para simplificar, é internacionalmente aceite considerar que o clínquer arrefecido corresponde à composição de um estado de equilíbrio total entre os componentes cristalizados como se se mantivessem àquelas temperaturas elevadas. Aliás é esta conversão que permite determinar a designada por

“**composição potencial**” ou “**composição de Bogue**” de um cimento a partir das quantidades de óxidos determinados por análise química (Neville, 1995).

O método proposto por Bogue, hoje universalmente aceite como primeira aproximação através da norma americana ASTM C 150, pois presta muito bons serviços para rápidas apreciações da qualidade do cimento, consiste, em resumo, no seguinte:

Parte-se da análise química do cimento, em óxidos elementares, tal como é fornecida directamente pelos métodos analíticos usuais. Note-se todavia que na análise deve figurar a determinação do óxido de cálcio livre, o qual se deve subtrair do óxido de cálcio total determinado, de modo a obter a parte deste óxido que está combinada. À percentagem de sílica deve também subtrair-se o chamado resíduo insolúvel, quase exclusivamente constituído por sílica no estado livre, não combinada.

A análise química fornece as percentagens dos seguintes óxidos elementares:

CaO combinado,

SiO₂ combinado,


Al₂O₃,

Fe₂O₃,

MgO,

CaO livre,

SO₃, e ainda, eventualmente, TiO₂, Na₂O e K₂O (Coutinho, 1988).

A análise química dos cimento terá de ser conduzida de acordo com a norma  **NP EN 196-2 – (2006): Métodos de ensaios de cimentos. Parte 2: Análise química dos cimentos.** (Esta norma substitui a EN 196-2:1994 e incorpora a EN 196-21:1989).

Com as percentagens dos óxidos elementares e utilizando as fórmulas seguintes calcula-se então a composição potencial ou de Bogue:

$$C_3S = 4.07 (\text{CaO}) - 7.60(\text{SiO}_2) - 6.72(\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.43(\text{Fe}_2\text{O}_3) - 2.85(\text{SO}_3)$$

$$C_2S = 2.87(\text{SiO}_2) - 0.75(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$$

$$C_3A = 2.65(\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.69(\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$C_4AF = 3.04(\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

No Quadro 2 apresentam-se a composição em óxidos de um cimento Portland habitual (anos sessenta), e a respectiva composição potencial ou de Bogue (Neville, 1995).

Quadro 2 – Composição em óxidos, resultante de análise química e respectiva composição de Bogue (Neville, 1995)

Composição em óxidos	%	Composição potencial (Bogue)	%
CaO (combinado)	63	C_3A	10.8
SiO ₂ (combinado)	20	C_3S	54.1
Al ₂ O ₃	6	C_2S	16.6
Fe ₂ O ₃	3	C_4AF	9.1
MgO	1.5	Compostos secundários	–
SO ₃	2		
K ₂ O	1		
Na ₂ O			
Outros	1		
Perda ao fogo	2		
Resíduo insolúvel	0.5		

Chama-se à composição assim calculada *potencial*, porque neste cálculo se supõe que não só todo o clínquer está cristalizado como já referido, não ficando nele nenhum material vítreo após o arrefecimento, mas também que os compostos formados são puros, sem inclusão de átomos estranhos. Nenhuma destas hipóteses é correcta, pois a experiência mostra que há sempre uma certa quantidade de massa vítrea no clínquer, que os componentes principais não são puros e que o composto ternário férrico tem uma composição geralmente distinta da do aluminoferrato tetracálcico (Coutinho, 1988).

Hoje existem vários métodos para determinar a composição de cimento Portland tais como métodos de difracção de raio X, microscopia óptica, microscopia electrónica de varrimento, dissolução selectiva, análise termo-gravimétrica, o método de Bogue aperfeiçoado (ver Lea's – Chemistry of Cement and Concrete, pg 197).

De qualquer forma é importante ter sempre presente que as propriedades de um cimento dependem não só da composição da matéria prima, como também das condições de cozedura e de arrefecimento.

3.6 HIDRATAÇÃO

O clínquer depois de arrefecido é então moído com uma pequena percentagem de gesso e é este produto que se designa por cimento e que em contacto com a água dá origem a um novo sistema de compostos hidratados estáveis que cristalizam com hábito acicular, emaranhando-se e colando-se uns aos outros, conferindo ao conjunto uma resistência elevada.

3.6.1 Presa, endurecimento e hidratação

Durante um período inicial designado por **período dormente** ou **de indução**, após a amassadura de água e cimento, a fluidez ou consistência da pasta mantém-se relativamente constante e embora se verifique uma perda gradual de fluidez, é possível recuperá-la se se reamassar a pasta.

Em geral 2 a 4 horas depois da amassadura, a temperaturas normais, a mistura começa a ganhar rigidez muito mais rapidamente e considera-se que se atingiu o **início de presa**. No entanto a resistência é ainda muito baixa e o endurecimento só começa após o **fim de presa** que ocorre uma horas depois. O endurecimento é ,depois, muito rápido nos primeiros um ou dois dias a seguir e, posteriormente, a resistência continua a aumentar mas a uma taxa cada vez menor, durante semanas, meses e anos.

A pasta de cimento desenvolve calor, em particular durante a presa e início de endurecimento. As reacções de hidratação são exotérmicas e se se medir o calor de hidratação ao longo destas fases, a temperatura constante, obtém-se curvas do tipo da Figura 27 (Domone, 1994)

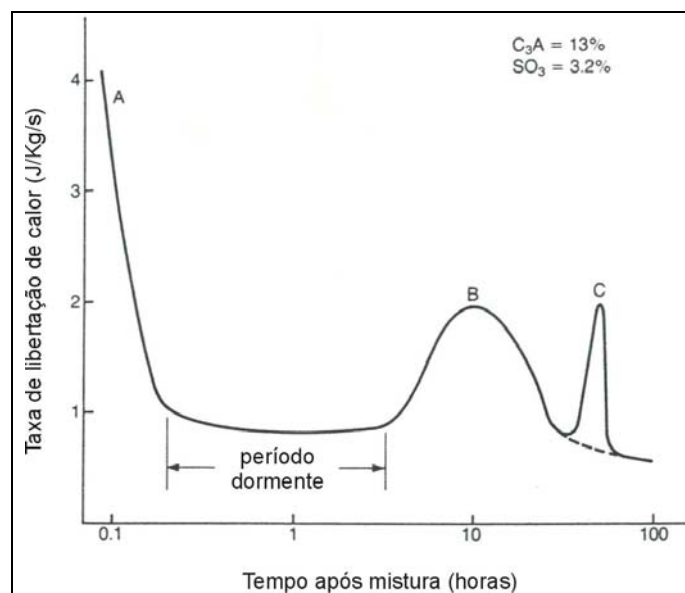


Figura 27 – Curva típica relativa ao desenvolvimento de calor de hidratação de cimento Portland, durante a hidratação e a temperatura constante (Domone, 1994).

Pensa-se que o máximo (A) resulta da hidratação inicial à superfície das partículas de cimento, sobretudo do aluminato tricálcico (C₃A) Neville, 1995).

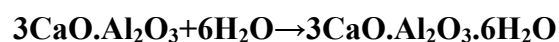
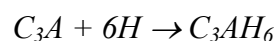
Este máximo (A) dura apenas alguns minutos, e a curva de desenvolvimento de calor decresce rapidamente, mantendo-se com um valor reduzido durante o já referido período dormente em que praticamente não se verificam reacções, e cuja duração é de 2 a 3 horas. A seguir ao período dormente, aproximadamente na altura correspondente ao **início de presa**, a taxa de libertação de calor começa a aumentar rapidamente (Domone, 1994) enquanto os produtos de hidratação de cada grão de cimento começam a desenvolver-se e a entrelaçar-se (Neville, 1995). A taxa de libertação de calor continua a aumentar, com a estrutura dos produtos de hidratação a densificar, atingindo-se entretanto o fim de presa. Cerca de 10 horas depois da amassadura o endurecimento prossegue e a curva de libertação de calor atinge o pico (B) correspondente à reactividade máxima de hidratação. Posteriormente a curva decresce gradualmente e, por vezes, poderá verificar-se um novo máximo (C), um ou dois dias depois.

Este comportamento é causado pela hidratação dos quatro componentes principais de cimento e pela interacção entre os produtos de hidratação

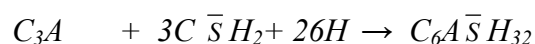
Note-se que o processo de hidratação do cimento é extremamente complexo e ainda hoje não é totalmente compreendido, existindo várias teorias sobre alguns dos fenómenos envolvidos.

Apresenta-se em seguida uma possível explicação simplificada da hidratação do cimento, procurando associá-la ao processo de libertação de calor nos primeiros dias, acabado de descrever:

O aluminato tricálcico no estado puro (C_3A), reage com a água muito rapidamente (ao fim de alguns minutos), conduzindo a uma presa **rápida** ou **instantânea**, acompanhada por desenvolvimento de calor (reacção 3, Quadro 3).



Para moderar ou retardar esta reacção é necessário **juntar ao cimento** um sulfato (cerca de 3 a 4%), o mais económico dos quais é o **gesso** natural. Este reage lentamente com a C_3A formando-se etringite (sulfoaluminato de cálcio hidratado, reacção 6 do Quadro 3) isto é, o gesso protege o C_3A da água (Coutinho, 1988; Domone, 1994, Neville, 1995, Odler, 1998):

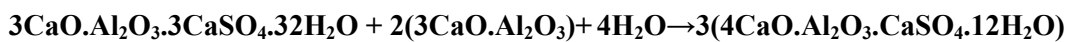
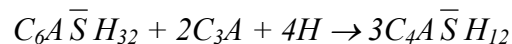




O período dormente (Fig. 27), caracterizado por uma reactividade baixa, é explicado por pelo menos 6 teorias diferentes e a mais vulgarmente aceite é a de que este período é causado pela formação de etringite (a partir de gesso) e sua precipitação sobre a superfície do C_3A cuja solubilidade é baixa em presença de sulfatos (Odler, 1998). O fim do período dormente parece ser devido ao desaparecimento da camada de protecção que envolve o C_3A , começando então a formação de produtos de hidratação CSH a partir do componentes do cimento.

Cerca de 24 horas depois, o gesso já foi totalmente consumido e começa a transformação da etringite em monosulfoaluminato ($3C_4A\bar{S}H_{12}$ ou $C_3A \cdot C\bar{S} \cdot H_{12}$) à custa de C_3A assim como hidratação do C_3A ainda não consumido (reacção 3, Quadro 3). São estas reacções que correspondem ao máximo (C) que por vezes aparece na cauda da curva de libertação de calor (Figura 27) mas isto só acontece com cimentos com teores elevados de C_3A isto é, superiores a 12% (Domone, 1994).

A formação de monosulfoaluminato resulta da combinação da etringite com aluminato tricálcico ainda existente (reacção 7, Quadro 3) (Odler, 1998):



À medida que a etringite é consumida também se forma aluminato hidratado de cálcio hexagonal C_4AH_{19} que pode formar uma solução sólida com o monosulfoaluminato $C_4A\bar{S}H_{12}$ ou individualizar-se em cristais (Odler, 1998).

Repare-se que o facto de se juntar gesso não evita totalmente a reacção (3, Quadro 3) de hidratação directa do C_3A , apenas a atrasa.

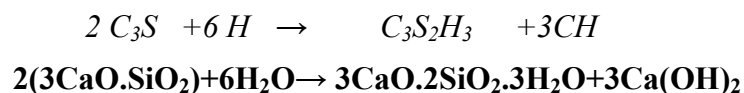
A hidratação do aluminoferrato tetracálcico (C_4AF) verifica-se durante o mesmo período da hidratação do C_3A e também envolve um composto intermédio com gesso (Domone, 1994). Os produtos finais da hidratação de C_4AF parecem ser aluminatos tricálcicos hidratados e uma fase amorfa ferrítica. É possível também que parte do óxido de ferro (Fe_2O_3) esteja presente em solução sólida nos aluminatos tricálcicos hidratados (Neville, 1995).

Segundo Coutinho (1988), de uma forma simplificada, poder-se-á dizer que o aluminoferrato tetracálcico (C_4AF) reagindo com a água liberta aluminato tricálcico e

ferrato monocálcico (reacção 4, Quadro 3). Este, reagindo com o hidróxido de cálcio já presente transforma-se em ferrato tricálcico (C_3FH_m) (reacção 5, Quadro 3), que forma soluções sólidas com o aluminato tricálcico hidratado (C_3AH). Desta maneira o aluminato tricálcico (C_3A) fica protegido da acção do ião sulfato, e por esta razão os cimentos resistentes à acção dos sulfatos devem conter uma proporção razoável de aluminoferrato tetracálcico (C_4AF) (Coutinho,1988).

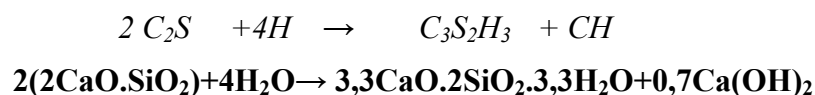
Todas estas reacções são muito mais complexas envolvendo a formação de soluções sólidas, não se tendo ainda chegado a um consenso sobre o que efectivamente se passa.

O silicato tricálcico C_3S (ou mais precisamente, a alite) ao reagir com a água liberta hidróxido de cálcio, uma parte da qual fica em solução, outra cristaliza. O silicato ao perder cálcio origina o bissilicato tricálcico ($C_3S_2H_3$) hidratado como se pode observar no Quadro 3, reacção 1 (Coutinho, 1988). Esta reacção é a mais rápida a realizar-se e, de facto, a maior contribuição para o pico B (Figura 27) da curva de evolução de calor resulta desta reacção. O produto desta reacção ($C_3S_2H_3$) é muitas vezes referido simplesmente como silicato de cálcio hidratado CSH e é responsável pela resistência atingida no cimento endurecido (Domone, 1994). A hidratação da alite, como dito, leva à formação de hidróxido de cálcio, que corresponde a 40% do total dos produtos de hidratação da alite (18% na belite) (Soroka, 1993).



Note-se desde já, o que é importante para o estudo das acções agressivas sobre o betão, que este silicato hidratado **somente é estável quando em contacto com soluções saturadas de hidróxido de cálcio** (que a 20°C contenham de 1585 mg a 1450 mg deste hidróxido por litro de água, o que corresponde a um domínio do **pH de 12,34 a 12,20**) (Coutinho, 1988).

O silicato bicálcico (C_2S), ao reagir com a água também liberta hidróxido de cálcio, embora em menor quantidade (cerca de 1/3 do libertado pelo silicato tricálcico) e transforma-se num outro silicato de cálcio hidratado (reacção 2, Quadro 3).

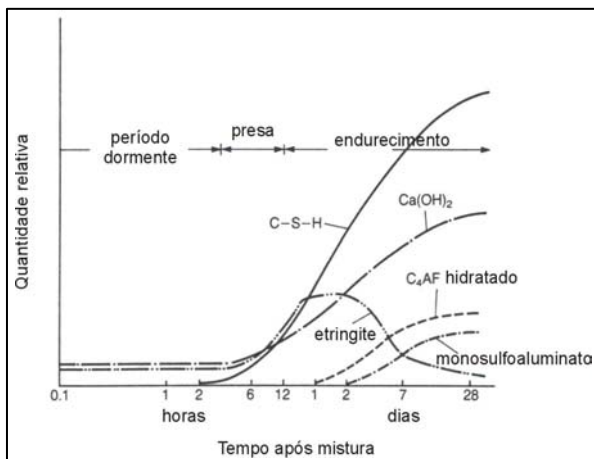


O domínio de estabilidade deste composto hidratado é muito maior do que o correspondente ao da hidratação do silicato tricálcico, pois vai até soluções com 130 mg de hidróxido de cálcio por litro de água, com **pH = 11,00** (Coutinho, 1988). O C_2S ou, rigorosamente, a belite reage mais lentamente que o C_3S mas os produtos da reacção são idênticos (CSH) como se pode observar no Quadro 3, reacção 2. A contribuição desta reacção para o calor de hidratação é reduzida (Domone, 1994).

Quadro 3 – Reacções de hidratação dos componentes principais do cimento Portland (com base em Coutinho, 1988; Domone, 1994; Neville, 1995 e Odler, 1998)

Referência no texto	Reacções	Compostos principais formados
1	$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$ $2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$	silicatos cálcicos hidratados
2	$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH$ $2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3,3CaO.2SiO_2.3,3H_2O + 0,7Ca(OH)_2$	silicatos cálcicos hidratados
3	$C_3A + 6H \rightarrow C_3AH_6$ $3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O$	Aluminatos tricálcicos hidratados <small>sem gesso (ou já sem etringite) calor de hidratação elevado</small>
4	$C_4AF + 7H \rightarrow C_3AH_6 + CFH$ $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 + 7H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O + CaO.Fe_2O_3.H_2O$	Alumino-ferratos cálcicos hidratados <small>formam soluções sólidas</small>
5	$CFH + 2Ca(OH)_2 + nH \rightarrow C_3FH_m$ $CaO.Fe_2O_3.H_2O + 2Ca(OH)_2 + nH_2O \rightarrow 3CaO.Fe_2O_3.mH_2O$	
6	$C_3A + 3\bar{C}S_2H_2 + 26H \rightarrow C_6A\bar{S}H_{32}$ $3CaO.Al_2O_3 + 3(CaSO_4.2H_2O) + 26H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$ etringite	evita presa instantânea
7	$C_6A\bar{S}H_{32} + 2C_3A + 4H \rightarrow 3C_4A\bar{S}H_{12}$ $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O + 2(3CaO.Al_2O_3) + 4H_2O \rightarrow 3(4CaO.Al_2O_3.CaSO_4.12H_2O) + \dots$ etringite monosulfoaluminato cálcico	
	NOTA: notação abreviada a itálico	

As quantidades acumuladas de cada produto ao longo de alguns dias



apresentam-se na Figura 28 e ao fim de um dia é aparente a preponderância de CSH acompanhada do crescimento de hidróxido de cálcio.

Figura 28 – Desenvolvimento típico dos produtos de hidratação em pasta de cimento Portland (Domone, 1994).

3.6.2 Hidratação e microestrutura

O endurecimento do cimento é lento, sobretudo da belite, pelo que em geral nunca se considera que as reacções se completaram mas que se atingiu um determinado **grau de hidratação**.

À semelhança da maioria dos processos químicos, a temperatura acelera as reacções de hidratação e com temperaturas baixas a velocidade de reacção diminui, chegando mesmo a anular-se quando a temperatura atinge os 10 °C negativos.

Tem sido levados a cabo, por utilização de diversas técnicas tais como microscopia electrónica de varrimento e técnicas de difracção de raios X, muitos estudos relacionados com a hidratação do cimento e a microestrutura resultante e tornou-se claro que o processo se desenvolve na interface sólido/líquido tendo como resultado produtos de estrutura complexa e com elevada superfície específica como esquematizado na Figura 29 (Domone, 1994).

Na Figura 30 apresenta-se um esquema do desenvolvimento microestrutural, também durante a hidratação, mas de um grão de cimento.

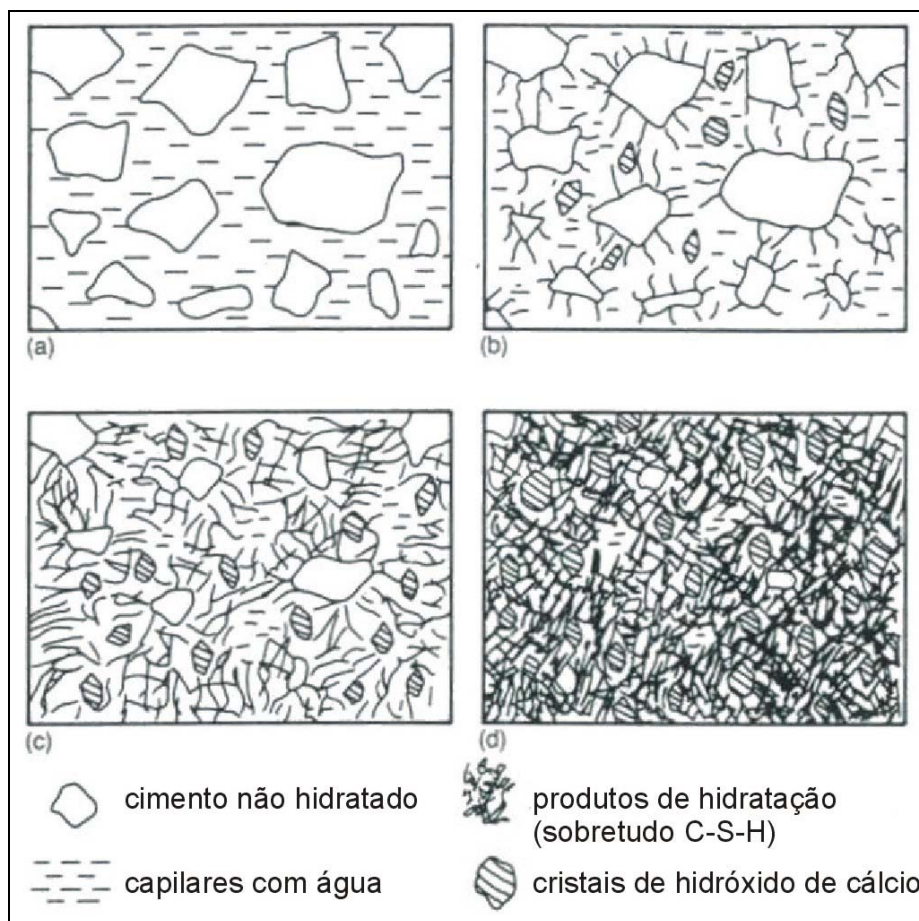


Figura 29 – Esquema do desenvolvimento da microestrutura da pasta de cimento durante a hidratação

a – cimento e água acabados de misturar. As partículas encontram-se dispersas na água de amassadura quer individualizadas quer em flocos. O espaçamento entre elas depende da razão água/cimento. Durante o período dormente forma-se etringite à superfície das partículas de cimento, sob a forma de agulhas.

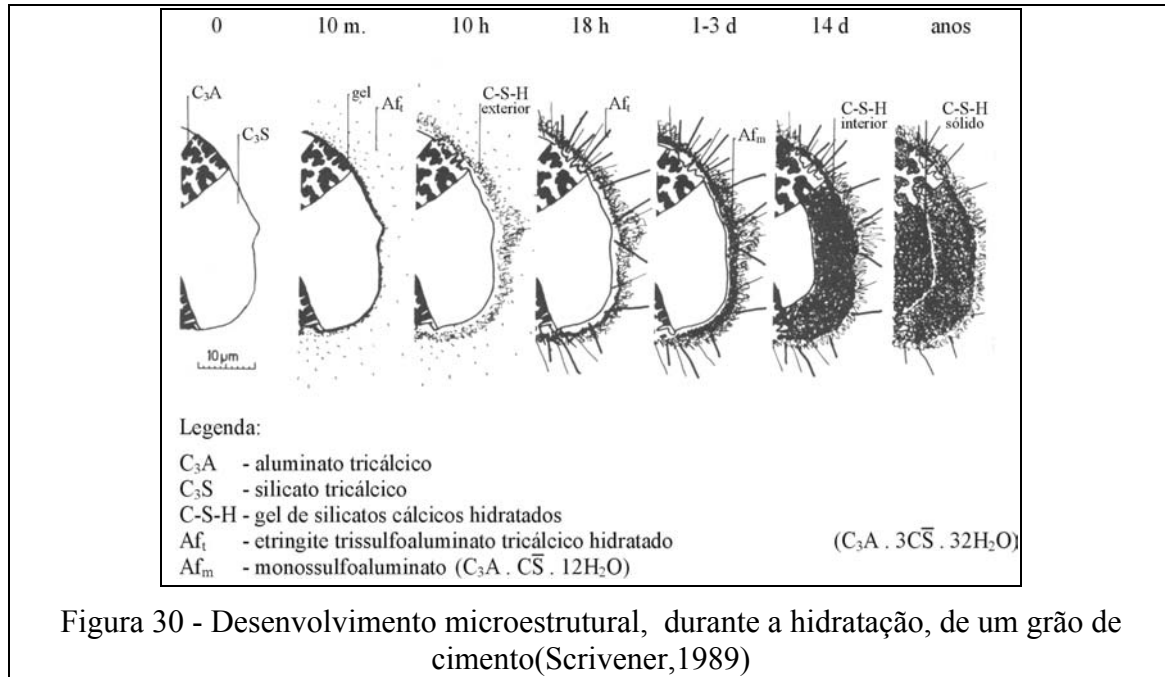
b – presa inicial – começo do emaranhamento de partículas de CSH a formarem-se e alguns cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. No final do período dormente, isto é, aproximadamente no início de presa, a etringite das partículas adjacentes começa a interferir e começam a formar-se partículas de CSH com aspecto de “papel de prata encorrilhado” e forma alongada. As camadas do “papel de prata” correspondem normalmente a 2 ou 3 camadas moleculares.

c – pasta de cimento com 2 ou 3 dias, já com maior resistência consequente da maior densidade de silicatos cálcicos hidratados a formarem-se entre o cimento não hidratado e os poros capilares.

Na fase seguinte prossegue a formação de gel CSH entre as partículas e a resistência aumenta. Os cristais de hidróxido de cálcio vão-se desenvolvendo e alguns poros de maiores dimensões ainda permanecem vazios assim como o interior dos grãos de cimento permanece desidratado.

d – pasta amadurecida – silicatos cálcicos hidratados de maior densidade a envolver cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, resíduos de cimento não hidratado e poros capilares (Domone, 1994).

0 min.	Grão não hidratado (a fase intersticial está ligeiramente exagerada)
10 min.	Algum C_3A reage com o sulfato de cálcio (gesso) em solução. À superfície do grão forma-se gel amorfo rico em aluminatos e também se desenvolvem a partir do gel e na solução, agulhas curtas de etringite (AF_t).
10 h	Reacção de C_3S que produz uma capa exterior de gel C-S-H a partir da rede de agulhas de etringite, deixando um espaço de 1 μm entre a superfície do grão e a capa hidratada.
18 h	Hidratação secundária de C_3A produzindo longas agulhas de etringite. Começa a formar-se gel C-S-H no interior da capa devido à continuação da hidratação de C_3S .
1-3 dias	C_3A reage com etringite que exista no interior da capa, formando-se placas hexagonais de monossulfoaluminato AF_m . A formação continuada de produtos no interior reduz a separação entre o grão anidro e a capa hidratada.
14 dias	Já se formou uma quantidade suficiente de C-S-H no interior para encher o espaço entre o grão e a capa. O gel C-S-H exterior tornou-se mais fibroso.
Anos	O material não hidratado reage através de um mecanismo lento, no estado sólido, formando-se gel C-S-H adicional, no interior. A fase ferrítica parece permanecer sem reacção zona branca junto de C_3A praticamente inalterada desde o início).



Poder-se-á dizer, finalmente que a **pasta de cimento endurecida** consiste em:

1. Resíduo de cimento ainda não hidratado no núcleo dos grãos originais
2. Os produtos hidratados, sobretudo silicatos de cálcio hidratados *CSH* mas também aluminatos de cálcio hidratados, sulfoaluminatos hidratados e ferrite.
3. Cristais de hidróxido de cálcio - Ca(OH)₂.
4. Poros capilares que correspondem aos espaços não preenchidos entre os grãos de cimento(Domone,1994).

Assim , a pasta de cimento endurecida é composta por hidratos pouco cristalizados de diversos compostos que constituem um material coloidal com superfície específica cerca de 500 a 1000 vezes a do cimento que lhe deu origem, designado por gel, por cristais de hidróxido de cálcio Ca(OH)₂, por cimento não hidratado, por vazios cheios de água e por outros componentes. Estes vazios designam-se por poros capilares e tem diâmetros a partir das dezenas de nanómetros (mediana cerca de 1300 nanómetros) enquanto que os vazios existentes no próprio gel (microporos ou poros do gel) tem dimensões mais reduzidas e de poucos nanómetros (Sousa Coutinho, 1998).

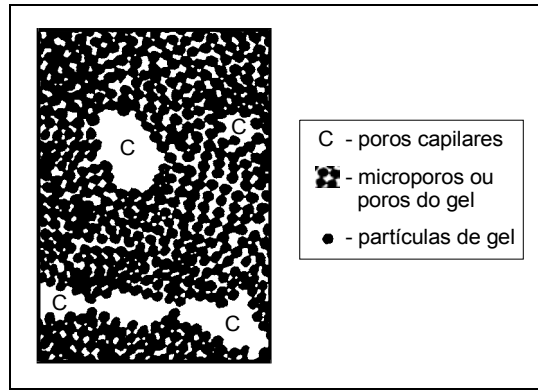


Figura 31 - Modelo simplificado da estrutura da pasta de cimento.

A rede porosa da pasta de cimento de um betão é constituída pelos poros descritos anteriormente - os poros do gel e os poros capilares e ainda, os poros de maiores dimensões - os macroporos resultantes da granulometria e do ar emulsionado com os componentes durante a amassadura e que não se conseguiu libertar durante a fase de compactação. Na Figura 32 apresenta-se uma classificação dos poros de acordo com a sua origem e tamanho, segundo Setzer (Sousa Coutinho, 1998).

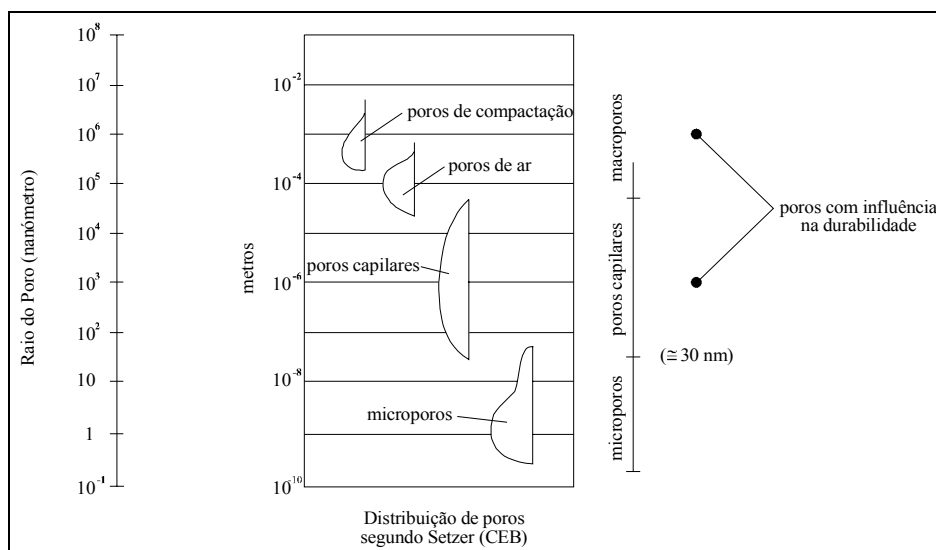


Figura 32 - Distribuição de poros segundo Setzer (Sousa Coutinho, 1998).

3.6.3 Calor de hidratação dos componentes

Foi analisado anteriormente o desenvolvimento do calor de hidratação ao longo dos primeiros dias de vida de pasta de cimento, isto é durante a presa e início de endurecimento.

Interessa agora analisar a contribuição de cada um dos quatro componentes principais.

O calor libertado após hidratação completa é aproximadamente igual à soma dos calores de hidratação dos componentes principais quando hidratados separadamente. Apresentam-se no Quadro 4 valores típicos do calor de hidratação (completa) dos componentes principais do cimento (Neville, 1995).

Quadro 4 – Calor de hidratação (completa) dos componentes principais puros (Neville, 1995).

Componentes	Calor de hidratação	
	J/g	Cal/g
C ₃ S	502	120
C ₂ S	260	62
C ₃ A	867	207
C ₄ AF	419	100

Assim a partir das percentagens dos componentes principais (C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF) é possível estimar com uma razoável precisão o calor de hidratação (completa) de um dado cimento (Neville, 1995).

Para além do calor da hidratação completa do cimento, interessa considerar sobretudo o que se passa no período inicial.

De facto a libertação do calor das reacções de hidratação assume particular importância quando se betonam, de uma só vez, peças em que qualquer das três dimensões é superior a 1 ou 2 metros (betão em massa), como por exemplo em barragens. Então, no período inicial, a velocidade da saída do calor para o exterior é inferior à taxa de libertação do calor de hidratação do cimento e a massa de betão vai aquecendo; à medida que o tempo passa, a libertação de calor atenua-se e a massa começa a arrefecer, criando-se então gradientes de temperatura tais, que podem originar fissuração devidas às tensões instaladas (Coutinho, 1988).

Sabe-se que os componentes principais que se hidratam mais rapidamente são o C₃A e o C₃S, pelo que reduzindo a percentagem destes componentes no cimento, o calor de hidratação desenvolvido no período inicial é mais baixo.

Repare-se também que num cimento de maior finura, na fase inicial, a superfície específica é maior, portanto as reacções são mais rápidas desenvolvendo-se mais calor de hidratação.

Numa fase mais avançada da hidratação a finura já não afecta o calor de hidratação.

Nas Figuras 33 e 34 apresenta-se a influência dos componentes C_3A e C_3S na libertação do calor (nas primeiras horas) de hidratação do cimento (Neville, 1995).

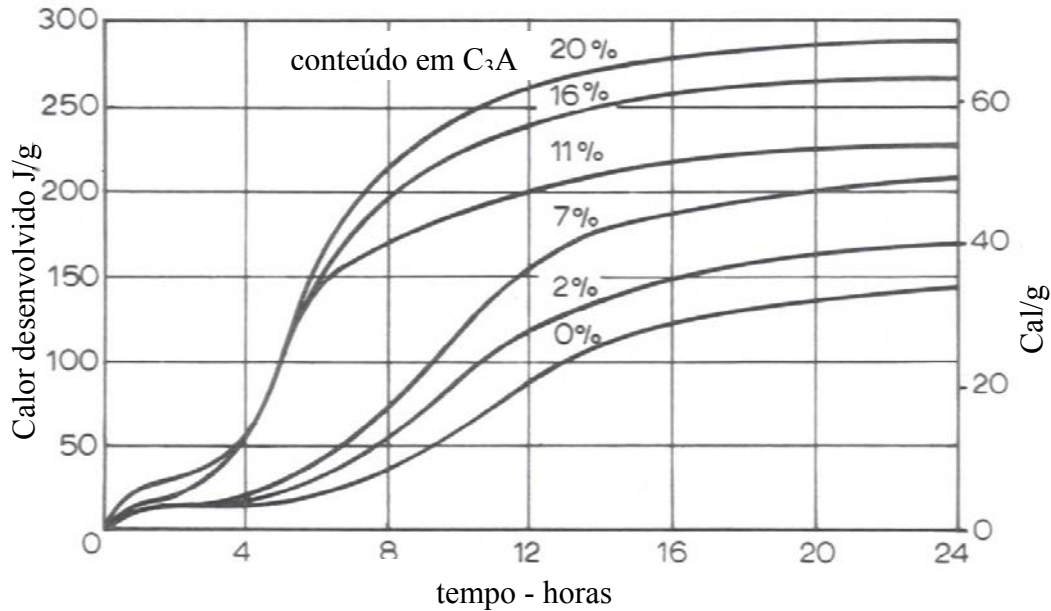


Figura 33 – Influência do conteúdo em C_3A na libertação de calor (Neville, 1995)

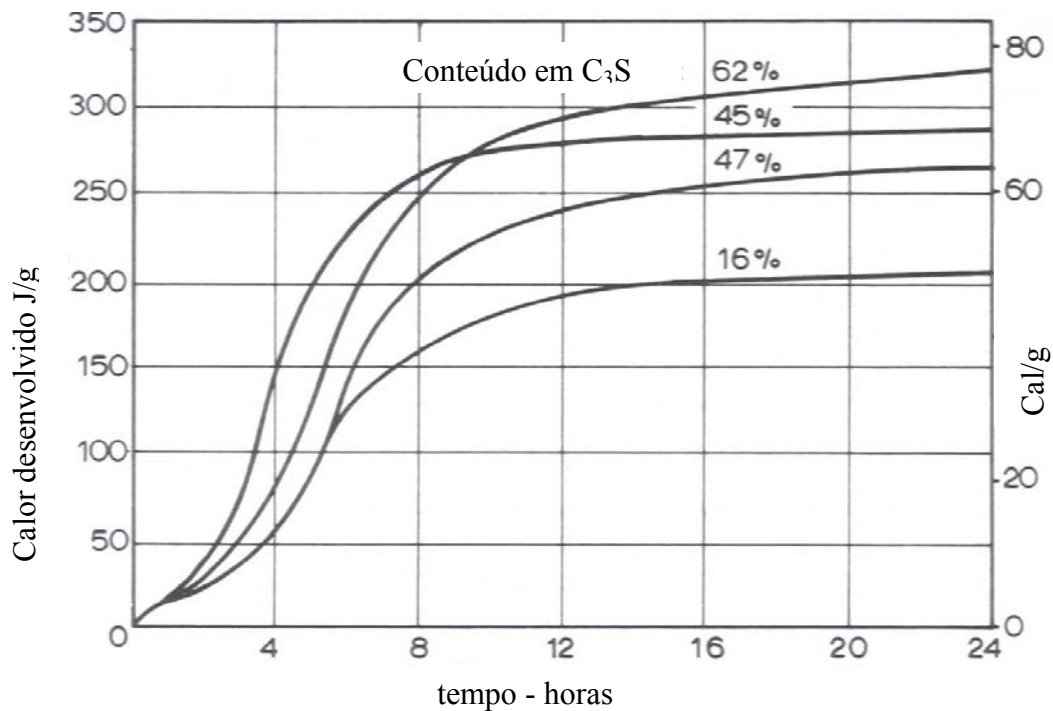


Figura 34 - Influência do conteúdo em C_3S na libertação de calor (Neville, 1995)

Em conclusão pode-se, portanto, reduzir o calor de hidratação usando um cimento com quantidades mais baixas de C_3A e C_3S , um cimento menos moído e ainda uma menor dosagem de cimento na composição do betão.

É de realçar ainda que o calor de hidratação pode ser vantajoso em tempo muito frio impedindo a congelação da água no betão fresco (Neville, 1994).

Repare-se que, em termos de normalização europeia os cimentos correntes de baixo calor de hidratação foram incluídos na EN 197-1 pela emenda 1 (NP EN 197-1:2000/A1 2005) e, por exemplo, os cimentos especiais de calor muito baixo de hidratação são contemplados na NP EN 14216 (2005).

3.6.4 Resistência dos componentes hidratados

A contribuição dos compostos hidratados individualizados para o desenvolvimento da resistência do cimento apresenta-se na Figura 35.

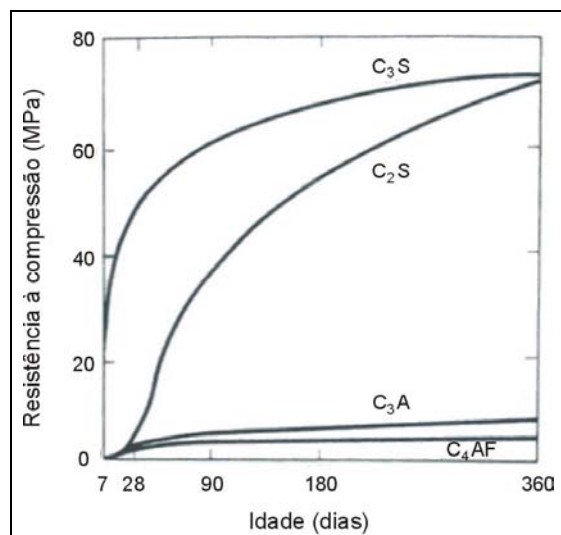


Figura 35 – Desenvolvimento da resistência nos compostos puros de cimento Portland.

Como visto anteriormente, a hidratação do cimento leva à formação de um gel rígido constituído essencialmente por partículas de **silicatos cálcicos hidratados (CSH)**. As partículas de gel são muito pequenas e portanto a superfície específica é muito elevada, cerca de 200 000 m²/kg (medida com vapor de água) (de 500 a 1000 vezes superior à s.e. das partículas do cimento original – Domone, 1994). As forças de coesão dependem das propriedades da superfície das partículas e portanto aumentam com o aumento de superfície específica. A resistência mecânica do cimento após presa é, portanto, sobretudo devida à elevada superfície específica do gel de cimento (Soroka, 1993).

3.6.5 A água no cimento hidratado

A água é um constituinte essencial da pasta de cimento e o seu papel na coesão é muito importante. De facto é útil classificar a água segundo o grau de dificuldade com que se liberta para o exterior:

1) **Água quimicamente combinada** correspondente a água de hidratação do cimento nas reacções referidas anteriormente. No processo de secagem da pasta de cimento endurecida esta água não se liberta.

Só é possível retirar esta água por aquecimento a temperaturas superiores a 1000°C às quais o material se decompõe (Domone, 1994). Esta água é por vezes determinada para calcular o grau de hidratação do cimento (Soroka, 1993).

2) **Água zeolítica ou intersticial** – Água ligada também à rede cristalina, mas que se interpõe nas lamelas do gel da pasta de cimento hidratada (nos poros de gel inferiores a cerca de 2,6 nm → 1 nm = 10⁻⁹m), de modo que a sua saída, ou entrada, não modifica a sua estrutura; apenas é alterado o espaçamento entre as camadas cristalinas, ou lamelas. As propriedades cristalinas não sofrem alterações quando a água zeolítica é eliminada; pois o cristal mantém a sua estrutura. A água zeolítica pode ser retirada, por exemplo, por secagem intensa a temperaturas elevadas ou reduzindo a humidade relativa do ambiente a valores inferiores a 10%, embora a perda desta água leve a uma retracção considerável pois as forças de Van der Waals conseguem aproximar as camadas cristalinas ou lamelas (Domone, 1994). A saída desta água é reversível e se novamente em atmosfera húmida o gel retoma gradualmente a água, afastando as placas ou lamelas

3) **Água (fisicamente) adsorvida** – A superfície dos produtos da hidratação do cimento é muito grande, dadas as pequenas dimensões dos cristais. A enorme quantidade de átomos à superfície de tais cristais, cujas forças não estão totalmente saturadas pelos átomos vizinhos, cria as chamadas forças de superfície, de adsorção ou de Van der Waals, que atraem as moléculas dos fluidos da sua vizinhança. As moléculas de água são fortemente atraídas pela superfície dos cristais dos componentes hidratados do cimento (Coutinho, 1988) podendo constituir até 5 camadas moleculares correspondendo então a

uma espessura de 1,3 nm . Quando a humidade relativa baixa a cerca de 30% uma parte desta água pode ser perdida correspondendo a uma importante parcela da retracção por secagem (Domone, 1994)

4) **Água capilar** – É a água que ocupa o espaço nos capilares e é livre da acção das forças de adsorção: resulta da condensação do vapor de água nos capilares e nos poros de gel maiores (5 nm); a sua quantidade varia com a humidade relativa da atmosfera e com o raio capilar. A entrada e saída são reversíveis, dependendo da tensão de vapor e da temperatura (Coutinho, 1988; Soroka, 1993).

5) **Vapor de água** – Os poros maiores podem estar parcialmente cheios com água e os restantes espaços contém vapor de água à pressão de equilíbrio com a humidade relativa e temperatura do ambiente circundante (Domone, 1994).

6) **Água livre** – É toda a água que está na pasta de cimento, ou no betão, sem sujeição a quaisquer forças, ficando livre de se evaporar durante o endurecimento da pasta ou do betão. (Encontra-se nos poros de dimensão superior a cerca de 50 nm).

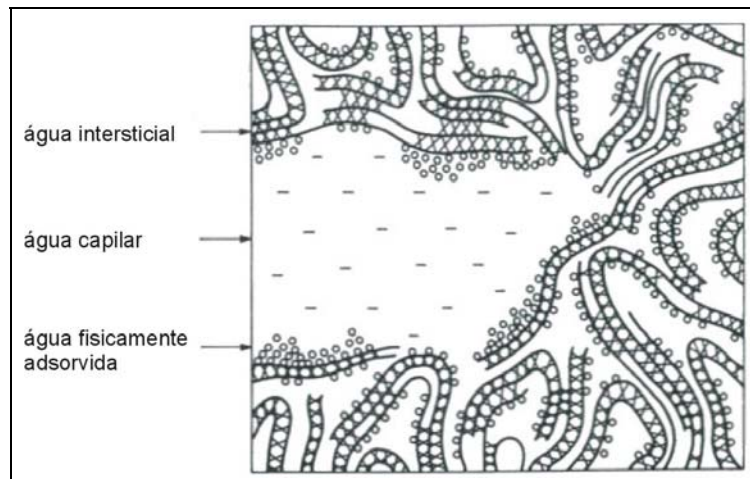


Figura 36 – Representação esquemática dos tipos de água no seio dos silicatos cálcicos hidratados CSH (Domone, 1994).

Na prática é, por vezes, difícil classificar numa categoria ou noutra a água, pois as diferentes espécies não se excluem, pelo que, quando se trata de fenómenos da secagem do betão, é mais prático distinguir apenas duas espécies de água; a **evaporável** e a **não evaporável**. Como o nome indica trata-se de uma distinção feita a partir do conceito de evaporação, o qual depende das condições de tensão de vapor e temperatura a que se sujeita a pasta de cimento.

NOTA: Por exemplo, Powers e Brownyard, com o fim de praticamente poderem distinguir a água nos estados que acabámos de enunciar, determinam a quantidade de água que na pasta de cimento hidratado se evapora a 23°C, num vácuo de 0,45 µm de mercúrio sob uma tensão de vapor obtida com uma mistura de perclorato de magnésio cristalizado com duas e com quatro moléculas de água, $Mg (ClO_4)_2 \cdot 2H_2O + Mg (ClO_4)_2 \cdot 4H_2O$, a que corresponde uma humidade relativa de $2,4 \times 10^{-5}$.

A água retida pela pasta de cimento nestas condições é a água não evaporável, que corresponde, aproximadamente, à água quimicamente combinada, pois os componentes hidratados do cimento, a esta tensão de vapor, perdem alguma água de cristalização. Em média é de 28 g por 100 g de cimento anidro, num cimento completamente hidratado. A água evaporável nas condições acima descritas é água livre, capilar, zeolítica e adsorvida (Coutinho, 1988).

3.6.6 Resistência química

A contribuição de cada componente para a resistência química do cimento também não é uniforme: há componentes, como o C_2S e os que contém ferro, que conferem maior resistência química do que os outros, como o C_3S e o C_3A .

No Quadro 5 indica-se a ordem de grandeza da contribuição de cada componente para as tensões de rotura, para o calor de hidratação, e para as resistências químicas.

Daqui se deduz que o componente que mais contribui para a tensão de rotura é o C_3S . É também ele que mais concorre para o calor de hidratação (se atendermos a que a sua proporção é sempre superior a duas, três ou quatro vezes a do C_3A) e possui a menor resistência química pois necessita estar em contacto com soluções saturadas de hidróxido de cálcio que são condições propícias para a formação do sulfoaluminato tricálcico expansivo, e para a reacção expansiva da sílica reactiva dos agregados com os álcalis do cimento.

Quadro 5 – Propriedades principais dos componentes do cimento (Coutinho, 1988; Neville, 1995)

Componentes	Calor desenvolvido após hidratação total		Tensão de rotura após hidratação			Resistência química
	J/g	Cal/g	7 dias	28 dias	1 ano	
C_3S	502	120	42,5	50,0	72,5	Pequena, por necessitar do contacto com soluções sobressaturadas de $Ca(OH)_2$
C_2S	260	62	2,0	6,7	70,0	Média, por necessitar do contacto com soluções de pH inferior a 12
C_3A	867	207	2,0	3,4	6,7	Fraca, por dar origem à formação do sulfoaluminato tricálcico
C_4AF	419	100	2,0	3,6	3,8	Boa

Também vem a propósito referir que a presença do C_3A no cimento é indesejável: contribui pouco ou nada para a tensão de rotura, excepto nas idades jovens; tem um desenvolvimento grande de calor ao reagir com a água, e, quando o cimento é atacado pelo ião sulfato, a expansão devida à formação do sulfoaluminato de cálcio a partir do aluminato pode levar à desintegração completa do betão, quando a reacção se dá num meio saturado de hidróxido de cálcio, como se disse.

Mas a presença do aluminato (e também do ferrato) é necessária para se obter uma fase líquida durante a **cozedura** do clínquer, o que permite a combinação da cal com a sílica. Se se não formasse essa fase líquida no forno a reacção levaria muito mais tempo, e provavelmente nunca seria completa. Sob este aspecto a alumina é muito mais eficaz do que o óxido de ferro; se ao fundente falta alumina, o líquido formado é muito mais viscoso, e a cozedura mais difícil. Observa-se assim que a alumina, indesejável no cimento, é no entanto necessária para a sua fabricação económica (Coutinho, 1988).

É costume apontar o C_3A como o componente indesejável no cimento portland. Daí a existência de cimento portland com baixas percentagens de aluminato tricálcico, como os cimentos do tipo V nos EUA (norma C 150 as ASTM) e de exigências de percentagem deste componente em diversos países, quando se pretendem elevadas resistências químicas do cimento portland.

Segundo A. Sousa Coutinho (Coutinho, 1988) o componente mais nefasto do cimento portland sob o ponto de vista químico é o C_3S .

De facto, o que distingue o cimento portland de todos os outros ligantes hidráulicos usados anteriormente à invenção do cimento portland é a presença de C_3S , obtido por cozedura a temperaturas superiores a 1300°C. É da sua existência que resultam as elevadas tensões de rotura que tornaram possível o emprego do betão como o material de construção do Século XX. É também devido a ele que é possível o betão armado e pré-esforçado pois, a elevada alcalinidade (pH = 12) permite a estabilidade do aço, sem corrosão e é precisamente devida ao facto de a hidratação do C_3S produzir compostos que são estáveis em soluções sobressaturadas de hidróxido de cálcio, meio em que o aço é imune à corrosão.

Mas este facto, existência de soluções sobressaturadas de hidróxido de cálcio no interior do cimento portland hidratado, pode ser a causa da sua destruição, porque é devido à presença de tais soluções sobressaturadas de hidróxido de cálcio que se forma o sulfoaluminato de cálcio expansivo (tanto a partir da alumina do cimento como da

alumina reactiva do agregado) e os silicatos alcalinos expansivos, a partir dos álcalis do cimento e da sílica reactiva do agregado.

Vê-se assim, que o C_3S causa da enorme aplicação do betão armado e pré-esforçado, é também a causa da sua deterioração. E este defeito pode ser eficazmente corrigido pela utilização de pozolana, escória granulada de alto-forno, etc., que diminuem o risco da expansão do betão pela acção da alumina do agregado ou do cimento, e da sílica do agregado (Coutinho, 1988).

3.7 PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E QUÍMICAS DOS CIMENTOS

Para serem aplicados com segurança, os cimentos têm de possuir determinadas características, algumas impostas por normas, entre as quais a massa volúmica, finura, resistência mecânica, características da presa, expansibilidade, perda ao fogo, resíduo insolúvel, teores de sulfatos e cloretos e pozolanicidade, que serão analisadas em seguida.

3.7.1 Massa volúmica dos cimentos

Para calcular a composição de um betão, para determinar a superfície específica de um cimento e por vezes, para verificar se o cimento está já parcialmente hidratado é necessário determinar a sua **massa volúmica**.

A massa volúmica é determinada pela maneira usual para qualquer sólido, conhecendo a massa e medindo o seu volume a partir do deslocamento de um líquido num volumenómetro apropriado, designado incorrectamente por “densímetro”, de Le Châtelier – Figura 37. O líquido que se emprega é a gasolina ou o petróleo. O procedimento vem descrito na especificação do **LNEC E 64 (1979) Cimentos. Determinação da massa volúmica.**

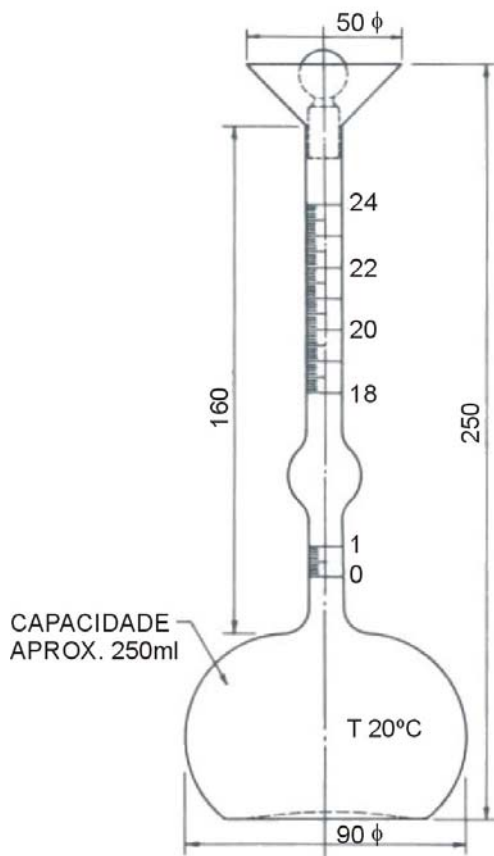


Figura 37 – Volumómetro de Le Châtelier.

O frasco, em banho-maria termo-regulado a 20°C, enche-se com 250 ml de gasolina até determinada marca, deitando-se em seguida uma quantidade previamente pesada de cimento (em geral 65,0 g), com cuidado, de modo a evitar a aderência às paredes. Depois de se deitar todo o cimento, o volumómetro é mantido em posição inclinada, rodando-o, a fim de que o ar se possa escapar. Logo que se termina esta operação tapa-se o frasco e coloca-se de novo no banho termo-regulador a 20°C. Quando se atingiu o equilíbrio térmico lê-se a nova posição do nível do líquido no gargalo do frasco, cuja diferença para a inicial dá o volume dos 65 g de cimento lá colocados. A massa volúmica é o quociente de 65 g pelo volume do líquido deslocado.

O conhecimento desta grandeza também permite detectar a existência de material inerte no cimento pois, um valor da massa volúmica inferior a 3,05 indica um cimento adulterado, mal cozido, ou ainda parcialmente hidratado (Coutinho, 1988).

Note-se que na normalização não são especificados valores mínimos para a massa volúmica do cimento pois muitos incluem adições cuja massa volúmica é mais baixa do que a do cimento Portland. Actualmente a massa volúmica, quando necessária, deve ser determinada segundo a **NP EN 196-6: Métodos de ensaio de cimentos. Determinação da finura**, de acordo com o procedimento descrito em 4.5.3. Este procedimento não contraria o descrito na E 64, mas sendo necessário fazer duas determinações e considerar para valor da massa volúmica a média dos dois resultados.

Apresentam-se no Quadro 6 os valores das massas volúmicas dos componentes do cimento Portland (CEM I) não hidratado e hidratado.

Quadro 6 – Massas volúmicas do cimento Portland antes e depois da hidratação
(Coutinho, 1988)

Massa volúmica dos componentes do cimento	Massa volúmica dos componentes hidratados
Silicato tricálcico, C ₃ S3,12 a 3,15	Hidróxido de cálcio, Ca(OH) ₂ 2,23
Alite3,14 a 3,25	Hidróxido de magnésio, Mg(OH) ₂ 2,40
Silicato bicálcico, C ₂ S3,28	3CaO . 2SiO ₂ . 3H ₂ O2,24
Aluminato tricálcico3,04	3CaO . Al ₂ O ₃ . 6H ₂ O 2,52
Aluminoferrato tetracálcico3,97	4CaO . Al ₂ O ₃ . 13H ₂ O2,02
Material escuro intersticial3,00	3CaO . Al ₂ O ₃ . 19H ₂ O,1,80
Óxido de cálcio3,32	3CaO . Al ₂ O ₃ . 3CaSO ₄ . 32H ₂ O 1,73
Óxido de magnésio3,58	3CaO . Al ₂ O ₃ . CaSO ₄ . 12H ₂ O1,99
	Cimento completamente hidratado2,13
TODOS SUPERIORES a 3 g/cm³	TODOS INFERIORES a 2,6 g/cm³

3.7.2 Finura

3.7.2.1 Introdução

Uma das últimas operações na produção de cimento e de resto, a que consome mais energia, é a que corresponde à moagem do clínquer misturado com gesso.

Como as reacções de hidratação começam à superfície dos grãos de cimento, o material disponível para reagir corresponde a área total da superfície dos grãos de cimento. Assim, a velocidade de hidratação depende da finura do cimento pelo que, quando se pretende uma resistência elevada aos primeiros dias é necessário que o cimento tenha uma elevada finura este facto não afectando a resistência a longo prazo – Figura 38. O aumento da velocidade no início da hidratação, conseguido à custa de uma maior finura do cimento acarreta, evidentemente, uma taxa maior de desenvolvimento de calor no início. Note-se também que o custo de moagem já em si elevado torna-se consideravelmente mais elevado quando se pretende uma finura acrescida além de que são necessários cuidados acrescidos na medida em que o cimento muito fino deteriora-se mais facilmente quando exposto ao ar.

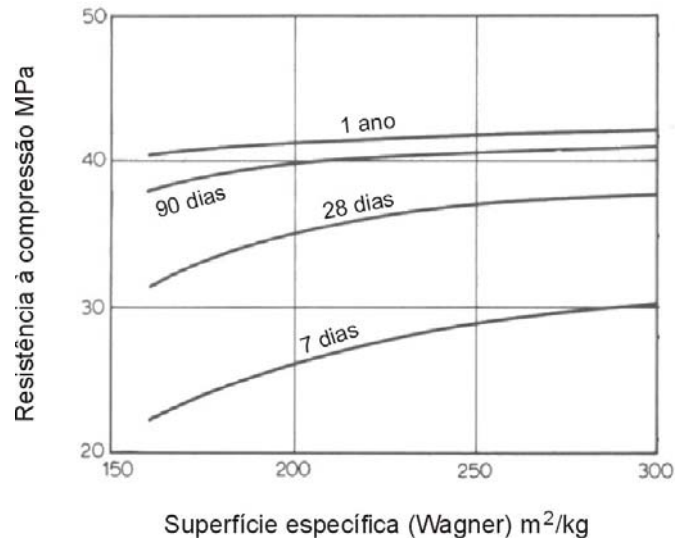


Figura 38 – Relação entre resistência de betões a diferentes idades e finura do cimento (Neville, 1995).

Uma finura elevada também conduz a uma reacção mais intensa com agregados com sílica reactiva e leva a que a pasta de cimento (não necessariamente o betão) apresente uma retracção mais elevada e fendilhe mais facilmente, mas apresente uma exsudação mais baixa.

Note-se que um aumento da finura leva a que se aumente a quantidade de gesso a juntar ao clínquer em virtude de haver mais C_3A disponível no início da hidratação (Neville, 1995).

Sendo a finura uma propriedade importante do cimento é necessário que seja cuidadosamente controlada. Existem diversos métodos para determinação da finura de cimento.

3.7.2.2 Métodos de determinação da finura de um cimento

- 1) **Resíduo de peneiração** – Um modo cómodo e rápido de determinar a finura foi utilizar peneiros; todavia os limites de finura determinados por este meio são incompletos pois a peneiração não é possível para dimensões inferiores a cerca de $50\mu\text{m}$, e mesmo para dimensões inferiores a $75\mu\text{m}$ é já aconselhável utilizar a peneiração por via húmida.

Antigamente e entre nós, o cimento não devia possuir um resíduo, no peneiro com malhas de $90\mu\text{m}$ de abertura, superior a 10,0%.

Hoje, a normalização actual não estabelece um limite para o resíduo de peneiração mas esta propriedade serve para verificação e controlo, detectando a presença de partículas grossas do cimento no processo de produção.

O método de ensaio para determinação do resíduo de peneiração vem descrito na norma **NP EN 196-6 (1990) Métodos de ensaio de cimentos. Determinação da finura.**

O método de peneiração para determinação do respectivo resíduo consiste em peneirar a seco uma amostra de cerca de 10 g de cimento com um peneiro com malha de abertura de 90µm e determinar o resíduo no peneiro após peneiração manual (ou mecânica). O ensaio é repetido e o resultado corresponde à média nos dois ensaios.

Note-se que o resíduo de peneiração não fornece informações sobre a dimensão dos grãos inferiores a 90µm e são as partículas mais finas que tem o papel mais importante nas reacções iniciais de hidratação.

Assim as normas actuais preconizam a determinação da superfície específica.

2) **Superfície específica** – A superfície específica de um cimento é a área superficial das partículas por unidade de massa do cimento (expresso por ex. em m²/kg).

A determinação da superfície específica pode ser levada a cabo por vários processos:

A – A partir da curva granulométrica

B – A partir da permeabilidade de um fluido que atravessa um camada de partículas

C – A partir da quantidade de um gás inerte adsorvido à superfície das partículas.

2A) *Superfície específica a partir da determinação da curva granulométrica:*

No primeiro processo a determinação da curva granulométrica é feita por sedimentação ou elutriação das partículas a partir da dependência da velocidade de queda livre das partículas num fluido em função dos respectivos diâmetros, isto é, da Lei de Stokes. O cimento deve estar bem disperso no fluido e evidentemente este deverá ser inerte relativamente ao cimento (Neville, 1995).

Existem vários métodos (ver Coutinho 1988, págs. 200 a 211) baseados na Lei de Stokes entre os quais o **método de Wagner**. Neste método, descrito na especificação LNEC E65, determina-se a um dado nível, a concentração das partículas numa suspensão de cimento em petróleo, a partir do conhecimento da absorção luminosa de um feixe de luz que, a esse nível, passa através da suspensão – Figura 39 (Coutinho, 1988).

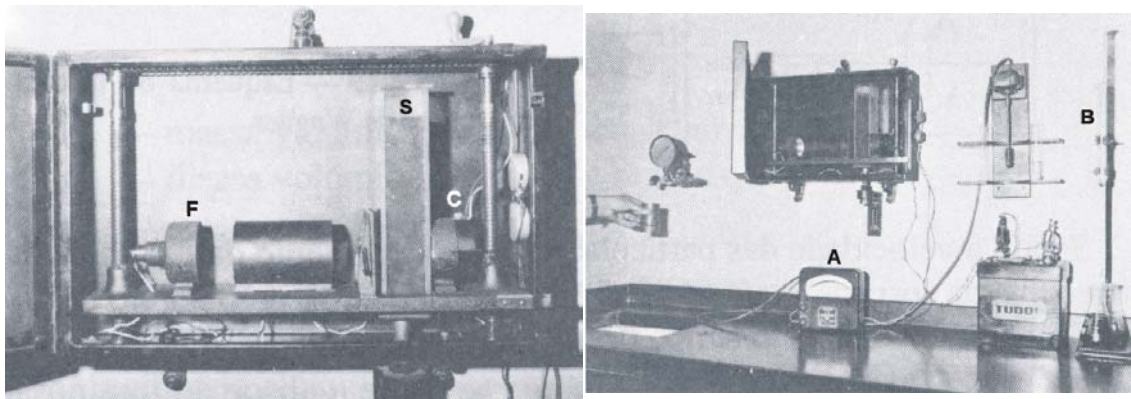
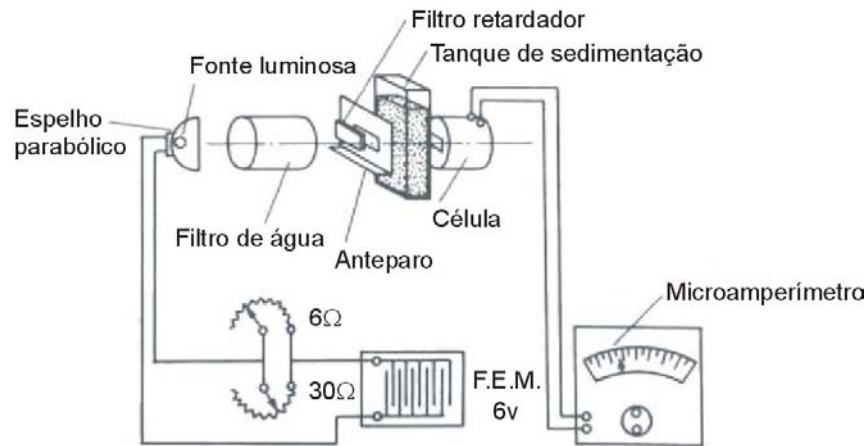


Figura 39 – Turbidímetro de Wagner: câmara com a fonte luminosa F, suspensão do cimento S, e célula fotoelétrica C; conjuntos de aparelhos com o amperímetro A, e bureta para medição dos tempos B (Coutinho, 1988).

Na Figura 40 apresenta-se um exemplo de uma curva granulométrica de um cimento obtido pelo método de Wagner e a curva correspondente aos valores (acumulados) da superfície específica para 1 grama desse cimento.

Note-se que para partículas inferiores a $7.5\mu\text{m}$ no método de Wagner assume-se que a granulometria é uniforme e que portanto o valor médio dessa fracção é $3,75\mu\text{m}$, o que leva a subestimar a verdadeira superfície destas partículas mais pequenas. Assim o resultado deste método terá que ser corrigido por um factor de conversão de 1,6 a 2,2, dependente da finura de cimento e do conteúdo em gesso, para ser comparável com resultados do método de Blaine que será visto em seguida (Neville, 1995).

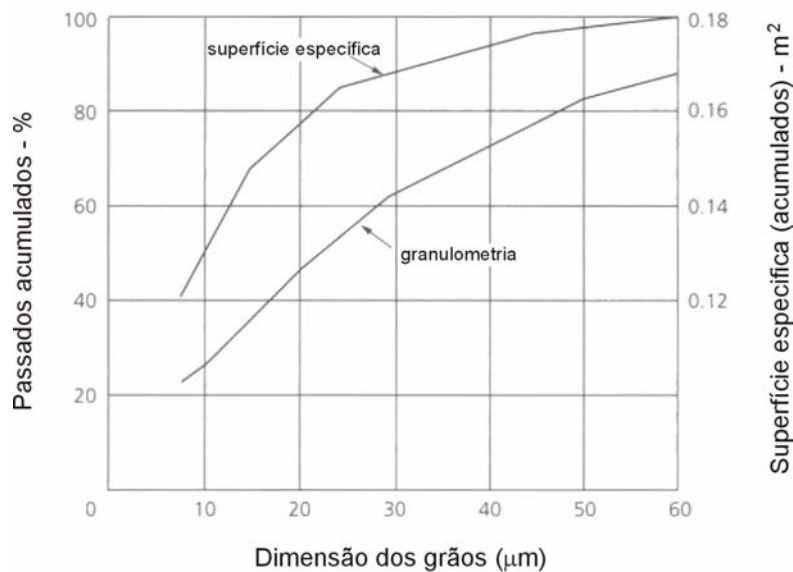


Figura 40 – Curva granulométrica de um cimento (1 grama) obtida pelo método de Wagner e curva da superfície específica acumulada em função da dimensão dos grãos (Neville, 1995).

Outros métodos baseados na Lei de Stokes são os métodos de elutriação tais como o **método do fluorómetro**. O processo de elutriação é inverso da sedimentação, mas a Lei de Stokes também se aplica quando a partícula é sujeita a uma corrente ascendente de um fluido desde que a velocidade seja suficientemente pequena. O fluido que se utiliza para a curva granulométrica é o ar seco.

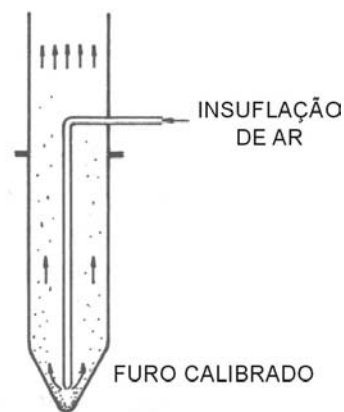
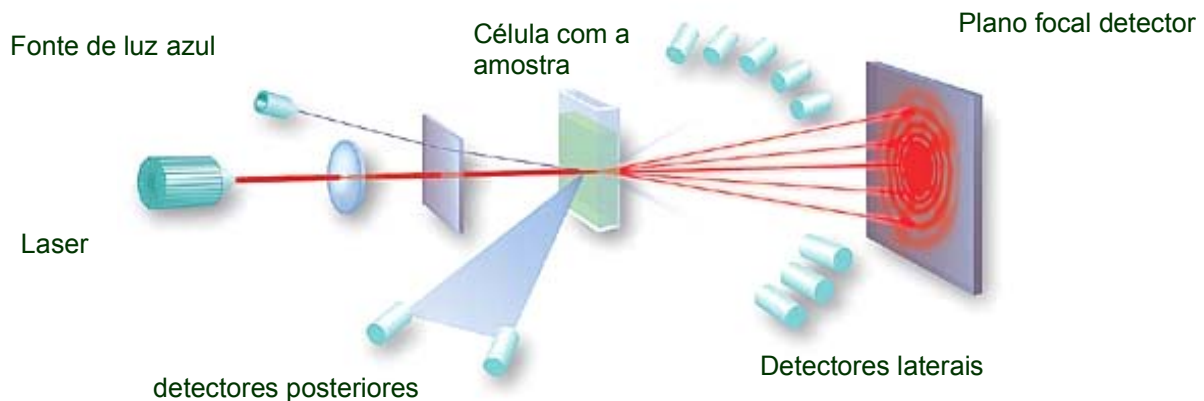


Figura 41 – Fluorómetro (Coutinho, 1988)

Outro método mais recente para a determinação da curva granulométrica é o método que utiliza o “Coulter counter” descrito por exemplo, na norma britânica BS3406.

Nos últimos anos tem-se tornado disponíveis métodos informatizados para determinar curvas granulométricas. Estes métodos, de difracção laser, são baseados na avaliação de pequenos ângulos de dispersão da luz. O princípio de funcionamento é baseado no facto de um feixe de luz se dispersar segundo uma gama de ângulos dependente da dimensão da partícula onde incide. Como, com um laser, é possível medir a intensidade da luz junto do feixe original então os resultados são convertidos numa curva granulométrica (Lawrence, 1998). Nas Figuras 42 e 43 apresentam-se o esquema de funcionamento de um **granulómetro laser** e na Figura 44 uma curva granulométrica de um cimento obtida no granulómetro do LABEST (Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural, FEUP).



—

Figura 42 – Esquema de funcionamento de um granulómetro laser. A difracção laser mede a intensidade da luz dispersa por um grupo de partículas numa gama de ângulos (Catita, 2006)

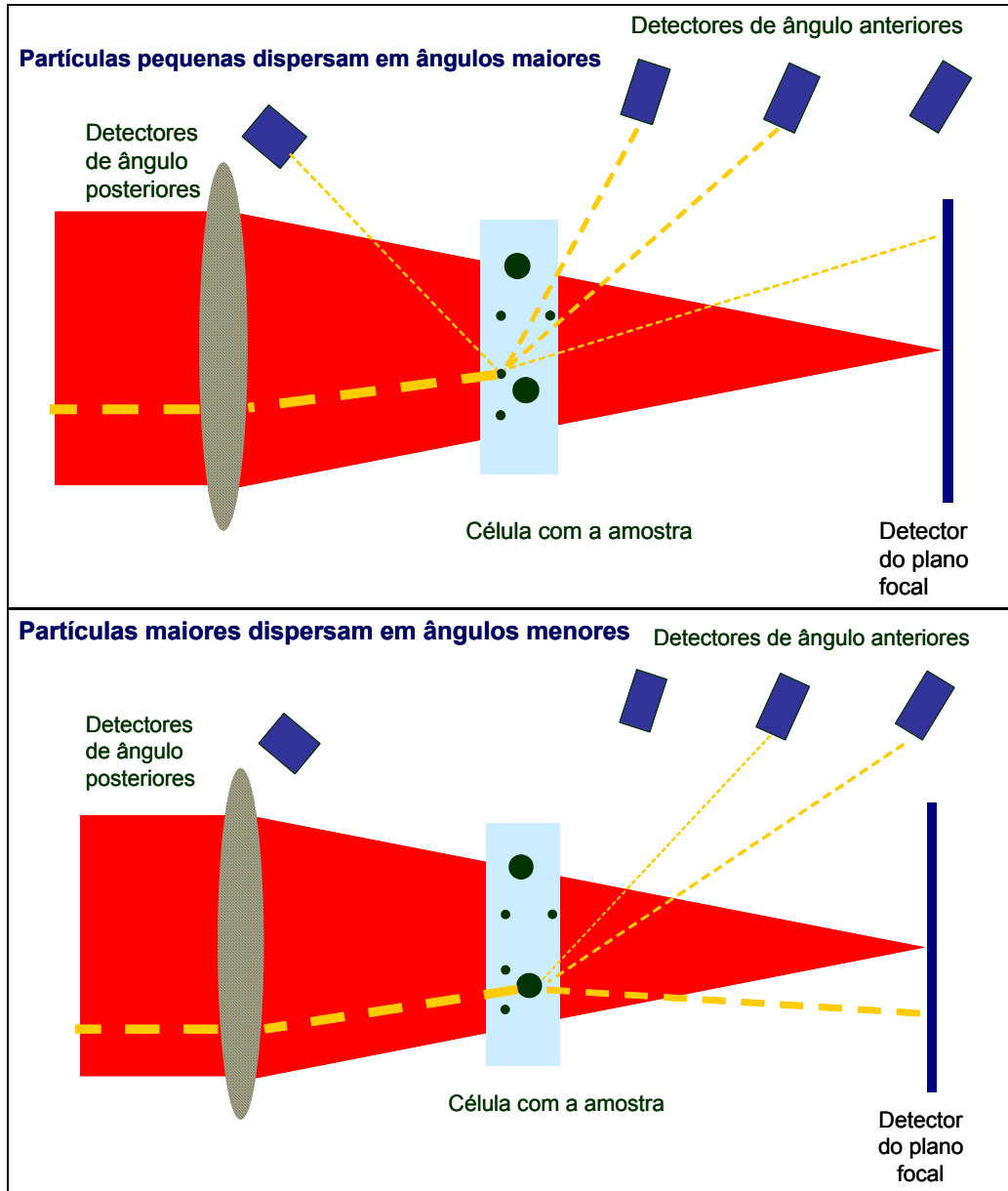


Figura 43 – Difracção laser. Princípios de funcionamento (Catita, 2006)

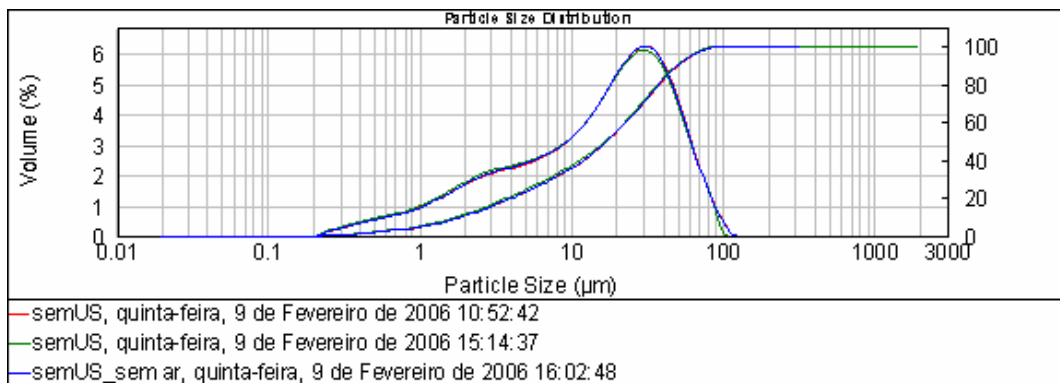


Figura 44 – Curvas granulométricas de uma amostra de CEM II 42.5 R.

2B) *Superfície específica a partir da permeabilidade de um fluido que atravessa uma camada de partículas:*

Estes métodos são baseados no facto de a resistência ao escoamento de um gás através de uma camada de pó compactado até um determinado volume, com uma porosidade conhecida, depender da superfície específica das partículas que compõem o pó.

A primeira aplicação deste princípio deve-se a Lea e Nurse que, em 1939, realizaram a montagem experimental que tem o seu nome. Blaine, em 1943, simplificou a montagem, tornando o método extraordinariamente prático, transformando-o o mais popular de todos para a determinação da superfície específica.

No método de Blaine obriga-se um volume de ar a atravessar uma dada camada de pó, sob uma pressão variável, cuja variação é constante para todos os cimentos em estudo. Determina-se o tempo que tal volume de ar leva a percorrer a camada, o que permite o conhecimento do coeficiente de permeabilidade (Coutinho, 1988).

O método de Blaine, normalizado pela norma **NP EN 196-6 (1990)**, consiste em fazer passar um determinado volume de ar a uma pressão média pré-definida em que o caudal de escoamento de ar através do cimento, vai diminuindo de uma forma constante. A massa de cimento utilizada é calculada conhecendo-se a sua massa volúmica e de tal maneira que corresponda, no contentor cilíndrico respectivo, uma camada de 10 mm de espessura e com porosidade normalizada de 0,500.

O tempo que o ar demora a atravessar a referida camada no permeabilímetro de Blaine – Figura 45, é medido e a superfície específica S , do cimento é dada por:

$$S = K\sqrt{t}$$

K – constante que depende do permeabilímetro (Coutinho, 1988, Neville, 1995).

Na Figura 46 podem-se observar algumas etapas da determinação da superfície específica de um cimento pelo método de Blaine.



Figura 45 – Pemeabilímetro de Blaine



Figura 46 – Determinação da permeabilidade

2C) *Superfície específica a partir da quantidade de um gás inerte adsorvido à superfície das partículas:*

O método de Blaine não é aplicável a pós muito mais finos que o cimento Portland tais como sílica de fumo ou cinzas volantes e então utilizam-se métodos de adsorção de gás, em geral de azoto (BET).

Pensa-se hoje que, para se obter uma elevada resistência aos primeiros dias com cimentos de determinada superfície específica, que a granulometria deve ser tal que pelo menos 50% dos grãos estejam contidos na fracção 3 a 30µm tendo portanto menos partículas muito finas ou muito grossas. Para se obter uma resistência inicial ainda mais elevada e uma resistência elevada a longo prazo parece que a gama de partículas na fracção 3 a 30µm deverá ultrapassar 95%, sendo então necessário cuidados especiais na moagem do clínquer. O facto de as partículas de 3 a 30µm serem benéficas parece resultar da heterogeneidade em termos de composição das partículas:

Dimensão das partículas < 4 µm → partículas muito ricas em SO_3 e álcalis

Dimensão das partículas > 30 µm → partículas muito ricas em C_2S

4µm < dimensão das partículas < 30 µm → partículas ricas em C_3S

É de referir ainda, que hoje a regulamentação não especifica valores mínimos da finura, nem em termos de resíduo de peneiração nem em termos de superfície específica pois a finura é indirectamente controlada pela resistência inicial. De qualquer forma um cimento Portland terá uma superfície específica de 350-380 m²/kg (Blaine) e de endurecimento rápido será ainda maior (Neville, 1995).

No Quadro 7 apresentam-se valores da superfície específica de dois cimentos diferentes avaliada por três métodos:

Quadro 7 – Superfície específica obtida por métodos diferentes (adaptado de Neville, 1995)

Cimento	Superfície específica (m ² /kg) avaliada por:		
	Método de Wagner	M. de Lea and Nurse (≅ Blaine)	Adsorção de azoto (BET)
A	180	260	790
B	230	415	1000
Portland de endurecimento normal		350-380	
Portland de endurecimento rápido		> 450	

3.7.3 Resistências mecânicas

A resistência mecânica do cimento é a propriedade mais importante em termos de utilização estrutural pelo que todas as normas fixam valores mínimos desta característica (Neville, 1995). Como a resistência depende, em elevado grau, das condições da amassadura, da preparação dos provetes, da natureza do ensaio escolhido, etc., é necessário prescrever a maneira exacta de ensaiar o cimento, de modo a obter resultados comparáveis (Coutinho, 1988).

A nível europeu e portanto em Portugal, a resistência mecânica de um cimento é avaliada segundo a norma (NP) EN 196-1 (2006) **Métodos de ensaio de cimentos. Determinação da resistência mecânica.**

Os ensaios preconizados são de flexão e compressão, embora seja a resistência à compressão a que é considerada de maior importância. Os ensaios são realizados em provetes de argamassa normalizada ao traço, em peso, de 1 parte de cimento, para 3 partes, de areia e com uma relação água/cimento de 0,5.

A resistência à compressão é obtida em provetes equivalentes a cubos de 40 mm de aresta que provêm de prismas 40 × 40 × 160 mm (três para cada idade para a qual se pretende determinar a resistência mecânica) que são inicialmente ensaiados à flexão de modo a obter-se meios prismas. Portanto é possível como opção, determinar a resistência à flexão com carga a meio vão e vão de 100 mm. (Coutinho, 1988; Neville, 1995; NP EN 196-1, 2006).

A argamassa normalizada, como referido ao traço 1:3:0,5, é fabricada à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e com pelo menos 65% de humidade relativa. A areia utilizada é uma areia normalizada CEN (Comité Europeu de Normalização) e consiste numa areia natural, siliciosa de grão arredondado com uma determinada curva granulométrica correspondente aos valores apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 – Granulometria da areia Normal.

Abertura do peneiro (mm)	Retidos acumulados (%)
2.00	0
1.60	7 ± 5
1.00	33 ± 5
0.50	67 ± 5
0.16	87 ± 5
0.08	99 ± 1

A água deve ser destilada, embora para ensaios correntes seja admitida a utilização de água da distribuição pública.

O cimento a ensaiar é passado por um funil com peneiro de malha 60 µm para evitar aglomerados de partículas.

A amassadura é realizada mecanicamente, num misturador – Figura 47, com dimensões e características especificadas na norma e segundo um procedimento determinado, esquematizado na Figura 48.



Figura 47 – Esquema do misturador para fabrico da argamassa normal para posterior determinação da resistência de um cimento.

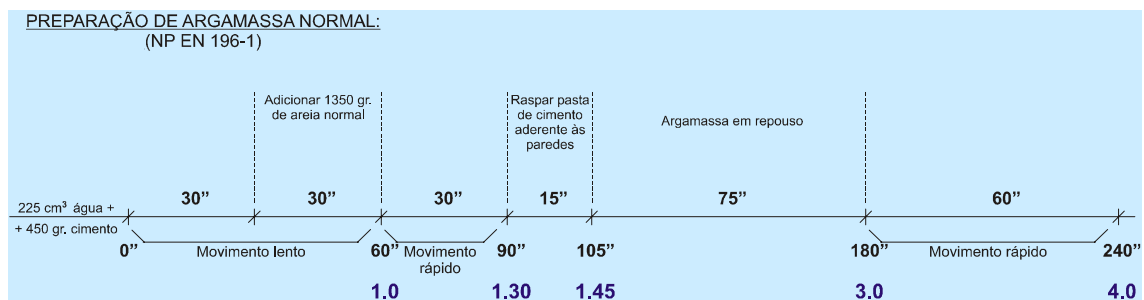


Figura 48 – Procedimento de fabrico da argamassa normal para posterior determinação da resistência mecânica.

Após a amassadura a argamassa é colocada em moldes de prismas com $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ onde é compactada em duas camadas num compactador – Figura 49 no qual, por cada camada, o molde de três prismas cai de uma altura de 10 mm com a frequência de uma queda por segundo durante 1 minuto.

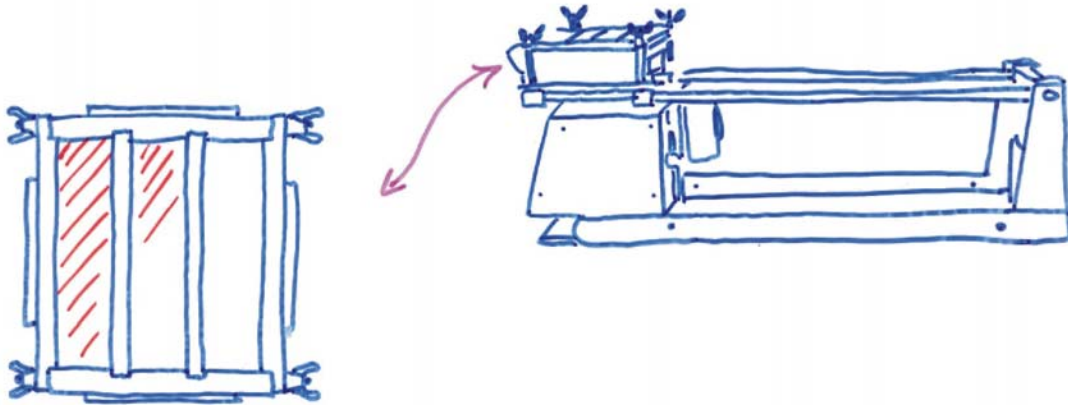


Figura 49 – Molde e aparelho compactador para provetes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ de argamassa normal.

Depois de alisada a superfície, o molde é tapado com uma placa que pode ser de vidro e é identificado. O molde é então conservado a uma temperatura de $20^\circ \pm 1^\circ\text{C}$ e humidade relativa superior a 90%. A desmoldagem é efectuada, no máximo, 20 minutos antes do ensaio se este for às 24 horas. Para idades superiores, a desmoldagem pode ser feita 20 a 24 h após a moldagem. Neste caso são conservados em água a $20 \pm 1^\circ\text{C}$ de tal modo que a espessura de água sobre os provetes não seja menor do que 5 mm.

Os provetes serão retirados da água no máximo 15 minutos antes de serem ensaiados e cobertos com um pano húmido até ao momento do ensaio.

A idade exacta dos provetes a partir do momento da amassadura do cimento com a água até ao início do ensaio de flexão e compressão deve estar entre os limites referidos no Quadro 9.

Quadro 9 – Limites de idade dos provetes para ensaios de resistência.

Idade	Idade exacta
48 h	$48 \text{ h} \pm 30 \text{ m}$
72 h	$72 \text{ h} \pm 45 \text{ m}$
7 d	$7 \text{ d} \pm 2 \text{ h}$
$\geq 28 \text{ dias}$	$28 \text{ d} \pm 8 \text{ h}$

O ensaio propriamente dito consiste em, com equipamento normalizado, a meio vão, aplicar uma carga vertical que cresce gradualmente ao ritmo de $50 \pm 10 \text{ N/S}$, sem choques, até à rotura, registando-se a força máxima de rotura por flexão – Figura 50.

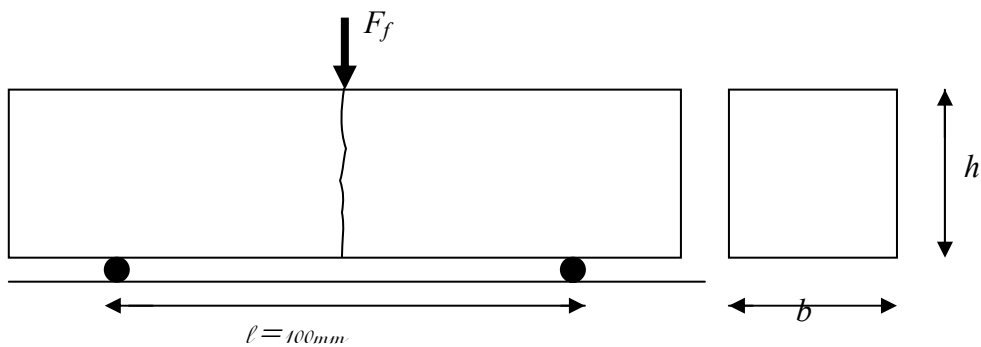


Figura 50 – Determinação da resistência à flexão de um cimento em provetes de argamassa.

Fazendo a determinação da carga máxima de rotura por flexão para cada provete e calculando a média dos três valores, a resistência à flexão do cimento é dada por R_f (MPa), pois:

$$M_{\text{máximo}} = \frac{F_f}{2} \times \frac{\ell}{2} = \frac{F_f \ell}{4}$$
$$R_f = \frac{F_f \ell / 4}{bh^2 / 6} = \frac{1,5F_f \ell}{b^3}$$

Em que: F_f – carga aplicada ao centro do prisma, na rotura (N)

ℓ – distância entre os apoios (mm)

b – lado da secção quadrada do prisma (mm)

Os meios prismas obtidos são então ensaiados à compressão em equipamento apropriado, normalizado. Depois de centrado em relação aos pratos da máquina – Figura 51, a cada provete é aplicada uma carga de uma forma gradualmente crescente, de modo contínuo, sem choques ao ritmo de 2400 ± 200 N/S até à rotura do provete, registando-

se a força máxima de rotura por compressão. Calculando a média dos resultados da força máxima de rotura por compressão dos seis meios prismas é possível então determinar a resistência à compressão R_c (MPa) do cimento:

$$R_c = \frac{F_c}{40 \times 40}$$

Em que: F_c – carga máxima de rotura por compressão (N).

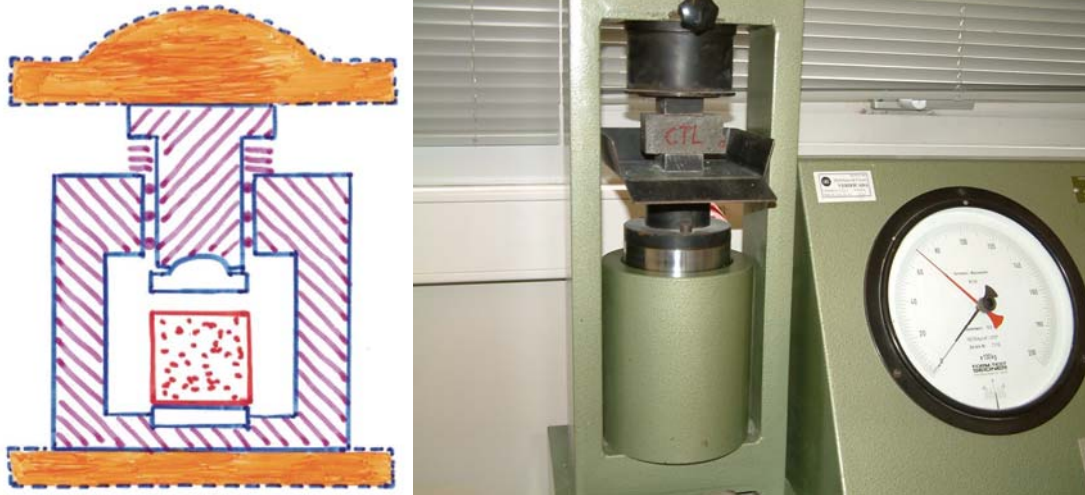


Figura 51 – Determinação da resistência à compressão do cimento.

Como referido anteriormente a resistência à compressão do cimento é a propriedade mais importante tendo que obedecer a valores mínimos especificados. Entre nós as normas NP EN 197-1 e NP 4326 classificam os cimentos em termos de resistência, em cimentos de endurecimento normal e rápido. Os de endurecimento rápido, como é evidente, dizem respeito a cimentos cuja resistência é elevada aos primeiros dias e estes cimentos terão que respeitar valores especificados aos 2 dias de idade. Apresentam-se no Quadro 10 os valores mínimos característicos (95% de probabilidade de serem ultrapassados) segundo aquelas normas.

Quadro 10 – Valores característicos resultantes do autocontrolo efectuado pelo fabricante (NP EN 197-1)

Classe de resistência	Resistência à compressão MPa			
	Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	
	2 dias	7 dias	28 dias	
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 10,0	-		
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20,0	-		
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-
52,5 R	≥ 30,0	-		

Repare-se que a designação da classe diz respeito também à resistência chamada “de referência”, que corresponde à resistência à compressão aos 28 dias determinada de acordo com a NP EN 196-1.

3.7.4 Presa

Já foi referido (em 3.6.1) o fenómeno de presa a propósito da hidratação do cimento pelo que se passará em seguida a descrever os métodos de ensaios relacionados com a presa, isto é, à passagem do estado líquido ao sólido, ou melhor, à rigidificação da pasta de cimento. É difícil determinar o instante em que se dá esta alteração no estado da pasta, pois esta sofre diversas gradações até atingir o estado sólido. Tem-se tentado definir o princípio da presa por diferentes métodos, como através da variação da condutibilidade eléctrica, da viscosidade e do desenvolvimento de calor, etc. Mas as dificuldades experimentais são bastante maiores do que o método imaginado há mais de um século pelo inventor do cimento Portland, Louis Vicat. Neste ensaio, normalizado pela norma **NP EN 196-3 (2006) Métodos de ensaio de cimento. Determinação do tempo de presa e expansibilidade**, mede-se a resistência de uma pasta de cimento à penetração de uma agulha com 1 mm² de secção, sob a acção de um peso de 300 g – Figura 52.

Distinguem-se em geral dois períodos para o tempo de presa: início e fim. O primeiro é o tempo decorrido entre a amassadura e a perda da plasticidade, e o fim de presa é o tempo necessário para que a pasta adquira a firmeza suficiente para resistir a uma certa pressão.

O primeiro passo deste ensaio consiste em fabricar uma pasta de consistência normalizada e designada por “pasta normal”. Por tentativas, vai-se juntando diferentes quantidades de água até a pasta colocada no molde tronco-cónico oferecer uma determinada resistência à penetração de uma sonda normalizada (com 10 mm de diâmetro) aplicada no aparelho de Vicat. Considera-se que a pasta é de consistência normal se a sonda penetra na pasta até uma distância de 6 ± 1 mm da base. Segue-se então a determinação do início de presa em que se vão fazendo leituras em intervalos de tempo sucessivos, com o aparelho de Vicat munido da agulha de Vicat até ao momento em que a agulha já não atravessa a pasta até ao fundo, ficando a 4 ± 1 mm da base.

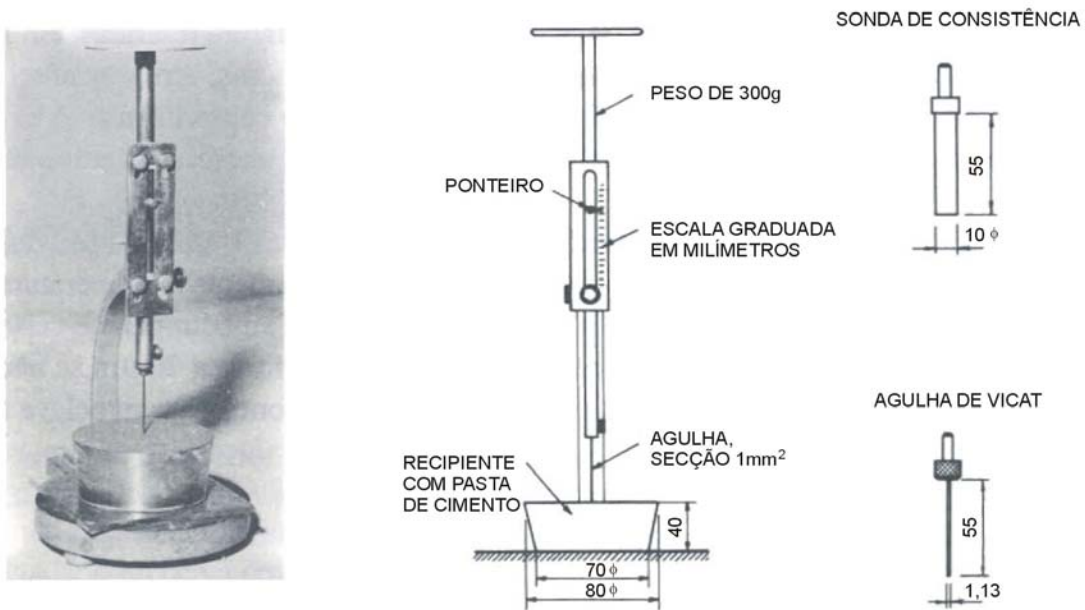


Figura 52 – Aparelho de Vicat para a determinação da consistência da pasta normal e do tempo de presa (Coutinho, 1988).

O fim de presa é determinado com uma agulha semelhante provida de um anel com 5 mm de diâmetro – Figura 53, de modo que a extremidade da agulha se projecta 0,5 mm para além da aresta deste acessório. Atinge-se o fim de presa quando a agulha, poisada na superfície do bloco de ensaio, deixa a sua marca, sem que o acessório circular imprima qualquer sinal, isto é, a agulha penetra menos de 0,5 mm.

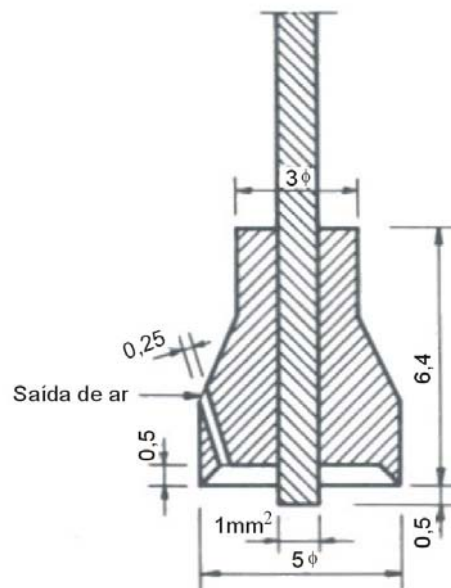


Figura 53 – Extremidade inferior da agulha para a determinação do fim de presa (cotas em milímetros). A agulha de 1 mm² de secção é substituída por esta no aparelho de Vicat (Coutinho, 1988).

A regulamentação em vigor (NP EN 197-1) limita inferiormente o tempo de início de presa de acordo com a classe de resistência do cimento, de acordo com os valores do Quadro 11.

Quadro 11 – Tempo de início de presa de acordo com a classe de resistência dos cimentos

Classe de resistência	Tempo de início de presa (minutos) de acordo com:	
	NP EN 197-1	NP 4326 (c. brancos)
32,5 N	≥ 75	≥45
32,5 R		
42,5 N	≥ 60	
42,5 R		
52,5 N	≥45	
52,5 R		

3.7.5 Falsa Presa

Como referido anteriormente a presa Rápida ou Instantânea resulta da reacção de hidratação exotérmica de C_3A na ausência de gesso.

A **Falsa Presa** corresponde à rigidificação prematura da amassadura alguns minutos após o fabrico, em que não se verifica libertação de calor apreciável, sendo possível restabelecer a plasticidade com uma reamassadura, sem consequências em termos de perdas de resistência. A Falsa Presa parece ser causada sobretudo pela desidratação do gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) durante o processo de moagem, formando-se sulfato de cálcio hemi-hidratado ($CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$) e/ou anidrite ($CaSO_4$) que, em contacto com água formam cristais aciculados de gesso enrijecendo a pasta (Neville, 1995).

3.7.6 Expansibilidade

É essencial que a pasta de cimento, após presa não sofra grandes variações de volume, em particular expansões que, se impedidas podem causar a destruição do material. Esse tipo de expansões podem ser causadas por hidratação retardada ou lenta (ou outras reacções) de alguns compostos presentes tais como:

- óxido de cálcio livre
- óxido de magnésio
- sulfato de cálcio

3.7.6.1 Expansibilidade causada por óxido de cálcio livre

Se a matéria prima com que o forno é alimentado contém um pouco mais de óxido de cálcio do que o necessário para se combinar com os silicatos e aluminatos ou se a queima ou arrefecimento são insatisfatórios, o óxido de cálcio em excesso continuará livre. A sua posterior hidratação será muito lenta e acompanhada por expansões, na medida em que corresponde à extinção dessa cal livre.

Repare-se que o facto de se misturar cal ao cimento (usual no fabrico de determinadas argamassas) não causa problemas de expansibilidade pois a cal hidrata antes da presa do cimento. Na realidade a cal livre do clínquer e que provoca expansibilidade, está cristalizada com outros compostos e portanto só parcialmente é que entra em contacto com a água antes da presa do cimento.

Como a expansibilidade apenas se manifesta alguns meses ou mesmo anos depois do fabrico, é importante verificar esta característica através de um ensaio acelerado, criado por Le Chatelier e regulamentado pela norma **NP EN 196-3 Métodos de ensaio de cimento. Determinação da presa e expansibilidade.**

Este ensaio consiste em começar por fabricar pasta de consistência normal, já referida em 3.7.4 e utilizada para determinar os tempos de presa. A pasta é colocada em dois aparelhos de Le Chatelier – Figura 54. O aparelho de Le Chatelier consiste num pequeno cilindro com 30 mm de diâmetro interno e 30 mm de altura, feito de chapa de latão com 0,5 mm de espessura. O cilindro é fendido de alto a baixo ao longo de uma geratriz, estando-lhe soldadas duas agulhas, com 150 mm de comprimento, de um lado e outro da fenda. Depois de cheio com pasta de cimento, o molde é coberto com duas placas de vidro e comprimido por um pequeno peso de 150 g de encontro à pasta, sendo o conjunto mantido dentro de água a $20 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Ao fim deste intervalo de tempo mede-se o afastamento entre as duas agulhas (e), e eleva-se a temperatura da água até 100°C em 1 hora, mantendo-se depois esta temperatura durante 3 horas. Deixa-se arrefecer e torna-se a medir a distância entre as agulhas. A diferença entre as duas medições representa a expansibilidade da pasta de cimento a qual não deve exceder, no caso das normas portuguesas NP EN 197-1 e NP 4326 o valor de 10 mm (Coutinho, 1988; Neville, 1995; NP EN 196-3:2006).

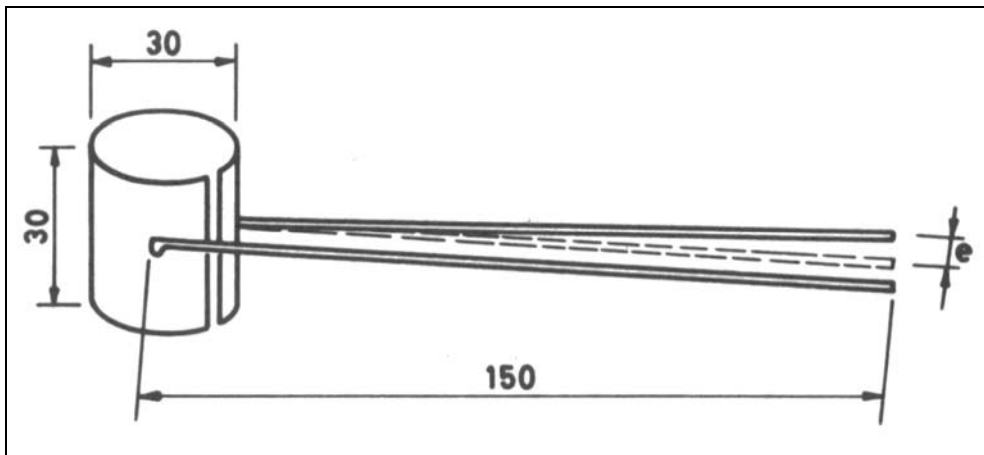


Figura 54 – Aparelho de Le Chatelier. Medidas em milímetros (Neville, 1995).

No caso de a expansibilidade ultrapassar o valor de 10 mm é possível repetir o ensaio depois de espalhar e arejar o cimento durante 7 dias em que poderá ocorrer a hidratação ou mesmo a carbonatação do óxido de cálcio. No fim deste período o ensaio de expansibilidade é repetido.

O ensaio com o aparelho de Le Chatelier apenas detecta a expansibilidade provocada por óxido de cálcio livre (Neville, 1995).

3.7.6.2 Expansibilidade causada pelo óxido de magnésio

Como referido a propósito do arrefecimento do clínquer (3.4.4) há toda a vantagem em evitar que a fase líquida cristalize pois, para além de outras desvantagens, o óxido de magnésio poderá cristalizar em cristais grandes (**periclase**) o que provoca a instabilidade e expansibilidade do volume da pasta de cimento endurecido.

De facto o óxido de magnésio é reactivo apenas sob a forma cristalina de periclase (em quantidade superior a 2% do cimento, em massa, pois até 2% combina-se com os componentes principais do cimento).

Por exemplo o óxido de magnésio presente na fase vítrea é inofensivo.

O óxido de magnésio (periclase) combina-se com a água de modo semelhante ao óxido de cálcio livre.

Na Europa e em Portugal a regulamentação não prevê ensaios para verificar a expansibilidade do óxido de magnésio pois não é costume a presença de grandes quantidades de magnésio na matéria prima usada.

Nos Estados Unidos é utilizado um ensaio que detecta simultaneamente a presença de óxido de cálcio livre e óxido de magnésio regulamentado pela norma ASTM C151 – 93a e que consiste no fabrico de barras de pasta de cimento colocadas em autoclave (pressão e temperatura elevadas) durante três horas. A expansão resultante tem de ser inferior a 0,8% (Neville, 1995).

3.7.6.3 Expansibilidade causada por sulfatos de cálcio

Foi referido anteriormente que para evitar a presa instantânea causada por hidratação do C_3A é necessário adicionar ao clínquer, uma certa quantidade de gesso – sulfato de cálcio bi-hidratado.

Quanto mais rico é o cimento em C_3A tanto maior a quantidade de gesso que se lhe tem de juntar.

Não se pode todavia aumentar muito o teor de gesso que se adiciona ao clínquer, pois uma quantidade exagerada de sulfato pode dar origem à formação de sulfoaluminato de cálcio expansivo, em condições de fazer perigar a estrutura do cimento hidratado. Por isso o teor máximo do sulfato, expresso em trióxido de enxofre, SO_3 é fixado em 3,5 e 4% dependendo do tipo de cimento, segundo a NP EN 197-1 e em 4 e 4,5% nos cimentos brancos, segundo a NP 4326.

3.7.7 Resíduo insolúvel

O resíduo insolúvel é a parte do cimento que não é solúvel a quente e em determinadas condições em ácido clorídrico e é determinado por procedimento descrito na NP EN 196-2:2006. **Métodos de ensaio de cimentos. Parte 2-Análise química.**

Dos componentes das matérias primas (em princípio calcário e argila) apenas o calcário é dissolvido no ácido clorídrico, pois a sílica, a alumina e os óxidos de ferro da argila não o são. Todavia depois da obtenção do cimento, estes compostos combinados são solúveis no ácido. Se a combinação das matérias primas fosse perfeita todo o clínquer seria solúvel no ácido e de facto, em cimentos bem cozidos a percentagem de resíduo insolúvel não excede 1% (Coutinho,1988).

Assim, para garantir que a combinação dos componentes da matéria prima tenha sido a melhor possível e para impedir que o gesso adicionado na produção seja de má qualidade (Jackson, 1998), com impurezas que provoquem a adulteração do cimento (Neville, 1995), as normas limitam o resíduo insolúvel. Nas normas em vigor em Portugal o resíduo insolúvel é limitado a 5% para os cimentos CEMI e CEMIII,

segundo a norma NP EN 197-1. (Se o cimento contém cinzas volantes a quantidade correspondente pode não ser solúvel em ácido clorídrico. De facto a parte siliciosa das cinzas não é solúvel, assim como alguns dos materiais usados como constituintes adicionais minoritários).

Para cimentos dos outros tipos a regulamentação não impõe valores limites.

3.7.8 Perda ao fogo

Esta característica é determinada pela perda de massa do cimento a 1000°C e demonstra o grau de carbonatação e hidratação do óxido de cálcio e de magnésio livres devido a exposição atmosférica (Neville, 1995). De facto os requisitos em termos de perda ao fogo estão associados à deterioração durante o armazenamento do cimento ou utilização de clínquer demasiado alterado por armazenamento prolongado no exterior. Um cimento com perda ao fogo elevada, normalmente apresenta baixa resistência (Jackson, 1998)

Um cimento bem cozido e bem conservado deve apresentar uma perda ao fogo de 3 a 4% mas como os cimentos hoje contém muitas vezes a adição de calcário (filer) a perda ao fogo é limitada, nas normas, por um valor mais elevado, de 5 %, para cimentos do tipo CEMI e CEMIII segundo a NP EN 197-1 e sem limite para cimentos em que as percentagens de calcário (filer) podem ser elevadas.

3.7.9 Cloretos

A acção dos cloretos em betão armado ou pré-esforçado é sobejamente conhecida.

Os cloretos alteram o tempo de presa do cimento e a velocidade do endurecimento, mas não são perigosos para o **betão simples** pois não formam compostos indesejáveis com os componentes do cimento, mesmo em doses muito elevadas. Mas no caso do **betão armado** ou **pré-esforçado**, isto é, com armaduras, então já é importante a presença do ião cloro que promove a sua oxidação sob a forma de ferrugem - Figura 55. A oxidação das armaduras provoca não só a diminuição da secção como também expansões, pois a ferrugem forma-se com um notável aumento de volume, como se pode verificar na Figura 56 (Sousa Coutinho, 1999).

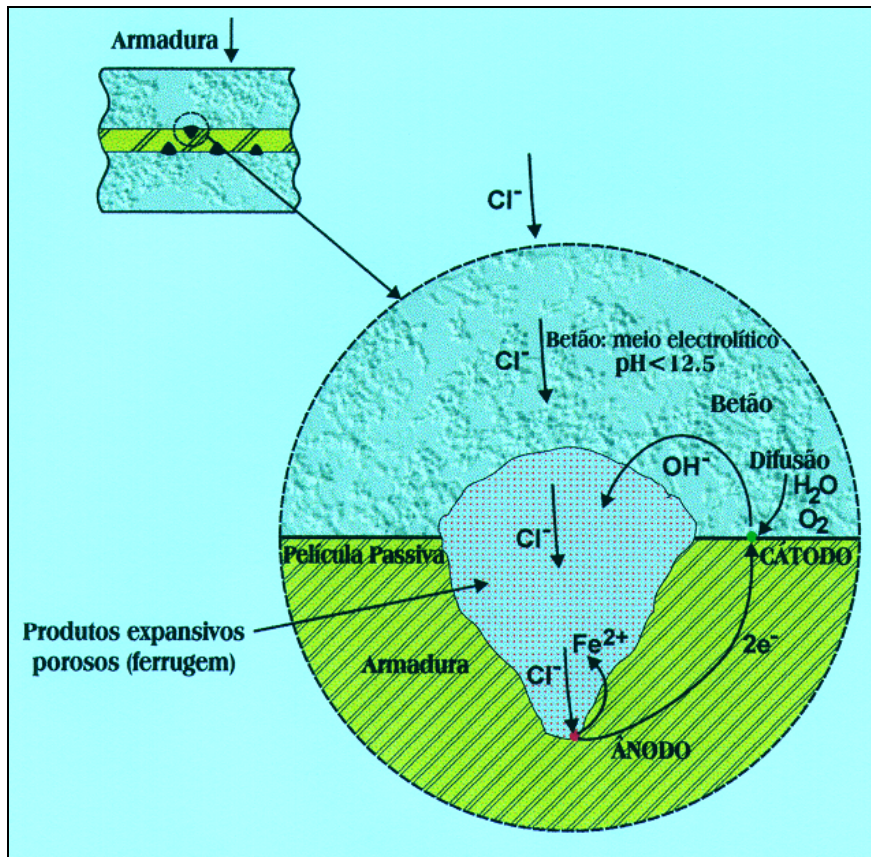


Figura 55 – Corrosão da armadura por "picadas" causada por cloretos.

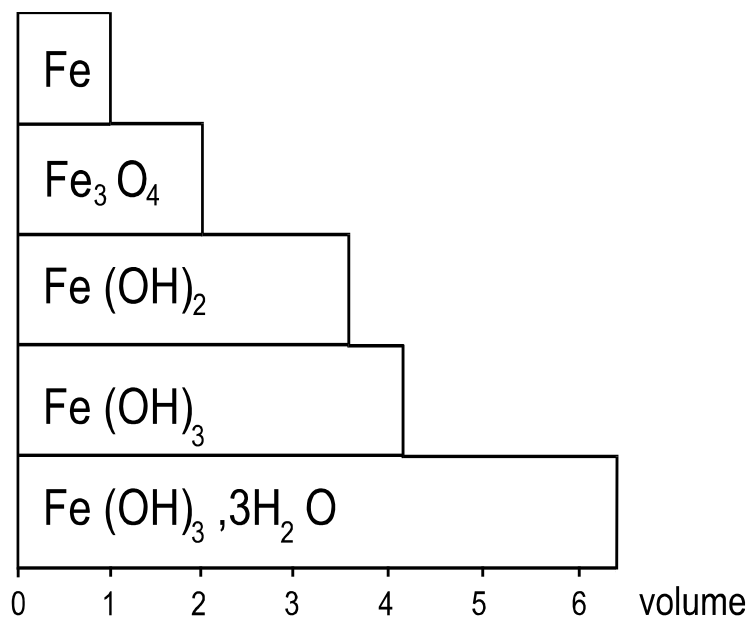


Figura 56 – Volume relativo dos produtos de corrosão.

Este aumento de volume acaba por romper o revestimento do betão – Figura 57, o que acelera mais ainda o processo de corrosão (Sousa Coutinho, 1999).

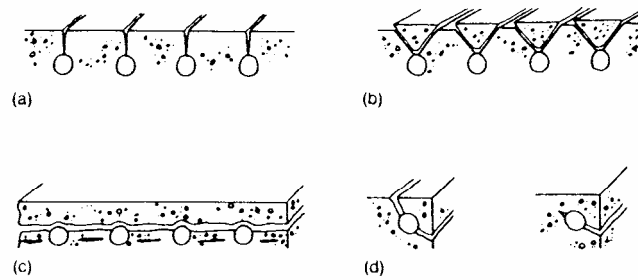



Figura 57 – Efeitos da corrosão da armadura: (a)-fendilhação, (b)-descamação, (c)-delaminação e (d)-efeito nos cantos

Assim é necessário garantir que no caso de betão armado ou pré-esforçado, não se produza, à partida, betão com cloretos pelo que se procede a ensaios para verificar a quantidade de cloretos existentes.

No que se refere ao cimento a quantidade de cloretos é determinada actualmente pela **NP EN 196-2:2006 Métodos de ensaios de cimentos – Análise química de cimentos**, cláusula 14.

Em termos de limites do teor em cloretos no cimento, segundo a NP EN 197-1 deverá ser inferior a 0,1% da massa do cimento (Quadro 3. NP EN 197-1) para todos os cimentos correntes embora para betão pré-esforçado o cimentos possam se produzidos para satisfazer um valor inferior, valor esse que deve ser indicado na guia de remessa e marcação  (ZA.4.1, NP EN 197-1).

Segundo a normalização actual o teor de cloretos de todos os constituintes do betão devem ser somados de forma que se verifique o estipulado nas secções 5.2.7 DNA 5.2.7 da NP EN 206-1, de onde se transcreveram os Quadros 12 e 13.

Quadro 12 - Máximo teor de cloretos do betão(5.2.7.,NP EN 206-1)

Utilização do betão	Classe do teor de cloretos ^a	Máximo teor de Cl ⁻ por massa de cimento ^b
Sem armaduras de aço ou outros metais embebidos, com excepção de dispositivos de elevação resistentes à corrosão	Cl 1,0	1,0 %
armaduras de aço ou outros metais embebidos	Cl 0,20	0,20 %
	Cl 0,40	0,40 %
Com aço de pré-esforço	Cl 0,10	0,10 %
	Cl 0,20	0,20 %

^a Para um uso específico do betão, a classe a aplicar depende das disposições válidas no local de utilização do betão ^{***}.
Quando forem utilizadas adições do tipo II e quando estas forem consideradas para a dosagem de cimento, o teor de cloretos é expresso em percentagem de iões cloreto por massa de cimento mais massa total das adições consideradas.

Quadro 13 - Classes de teor de cloretos do betão aplicáveis em Portugal (Quadro 1/DNA, 5.2.7, NP EN 206-1)

Utilização do betão	Classes de exposição ambiental	
	XC, XF, XA	XS, XD
Betão sem armaduras de aço ou outros metais embebidos, com excepção de dispositivos de elevação resistentes à corrosão	Cl 1,0	Cl 1,0
Betão com armaduras de aço ou outros metais embebidos	Cl 0,4 ⁽¹⁾	Cl 0,2 ⁽¹⁾
Betão com armaduras pré-esforçadas	Cl 0,2 ⁽¹⁾	Cl 0,1 ⁽¹⁾
⁽¹⁾ Estas classes podem deixar de se aplicar se forem tomadas medidas especiais de protecção contra a corrosão, como protecção do betão ou recobrimentos, devidamente justificados, ou utilização de aço inox.		

No entanto refere-se que em relação ao betão armado e betão pré-esforçado, consideram-se os mesmos valores de 0,4% e 0,2%, em relação à massa de cimento, respectivamente, para valores do "limite crítico do teor de cloretos no betão", limite a partir do qual haverá risco de corrosão das armaduras ... (Sousa Coutinho, 1999).

3.8 MODIFICAÇÕES NA COMPOSIÇÃO NO CLÍNQUER DO CIMENTO PORTLAND VERSUS USO DE ADIÇÕES

Os componentes principais do clínquer Portland têm propriedades muito diversas: uns hidratam-se rapidamente, dando lugar a elevadas tensões de rotura, outros fazem-no muito mais lentamente ou libertam grandes quantidades de calor durante a reacção com a água, outros ainda são responsáveis pelas alterações químicas que originam expansões, etc.. É possível modificar a composição da matéria-prima para se obter um cimento com determinada propriedade mais pronunciada do que outras, de modo a poder satisfazer as exigências da construção.

As alterações que se podem levar a cabo na composição do clínquer são:

1 - redução do C_3A

2 - redução do C_3S para que seja reduzida ou eliminada a libertação de $Ca(OH)_2$ que resulta sobretudo da hidratação do C_3S .

3 - aumento do C_3S para aumentar as tensões de rotura iniciais.

4 - redução ou eliminação da fase ferrítica.

1. O C_3A é indesejável, como visto anteriormente, pelas razões seguintes:

- promove a presa instantânea ou rápida

- aumenta o calor de hidratação
- é um dos responsáveis pela formação de sulfoaluminato de cálcio expansivo (etringite) quando o cimento hidratado está sujeito à acção dos sulfatos.

Além destas razões também:

- dificulta ou reduz a reactividade das pozolanas pois o C_3A ao hidratar-se fixa o hidróxido de cálcio que assim não se pode combinar com as pozolanas.

Assim sendo, é possível pela redução do teor em C_3A do cimento fabricar um cimento especial designado por **cimento resistente aos sulfatos**.

2. O $Ca(OH)_2$ livre resultante da hidratação de sobretudo do C_3S , em certos casos é indesejável pois as soluções sobressaturadas de hidróxido de cálcio são o meio necessário para:

- formação de sulfoaluminato de cálcio expansivo quando o cimento hidratado (ou a alumina do agregado) é atacado por sulfatos
- as reacções expansivas entre a sílica reactiva do agregado e os álcalis do cimento.

O C_3S também é indesejável por a sua hidratação ser acompanhada de um grande desenvolvimento de calor, à semelhança do C_3A .

Reduzindo a percentagem do C_3A e simultaneamente a percentagem de C_3S obtém-se os chamados **cimentos de baixo calor de hidratação**.

3. Em certos casos é necessário aumentar o conteúdo de C_3S para que se obtenham resistências iniciais elevadas. Estes cimentos designam-se por **cimentos de elevada resistência inicial**.

4. O óxido de ferro existente no cimento é o único componente responsável pela cor do cimento pois todos os outros componentes são brancos. Baixando a percentagem de sesquióxido de ferro a valores inferiores a 0,2% obtém-se **os chamados cimentos brancos**.

Resumindo, as 4 modificações na composição do **clínquer Portland** apresentadas traduzem-se nos cimentos referidos com propriedades particulares:

1. Redução do C_3A no clínquer Portland → cimento resistente aos sulfatos
2. Redução do C_3A e C_3S no clínquer Portland → cimento de baixo calor de hidratação
3. Aumento do C_3S no clínquer Portland → cimento elevada resistência inicial
4. Redução ou eliminação da fase ferrítica clínquer Portland → cimento branco.

Alterar as propriedades do cimento Portland por modificação da proporção dos componentes não pode ir muito longe visto que todas as componentes têm de estar presentes. Além disso modificar um dos componentes poderá ter vantagem sob determinado aspecto mas terá como consequência desvantagens noutros.

Por exemplo a diminuição do calor de hidratação arrasta a da resistência (diminuição das percentagens de C_3A e C_3S) e por vezes de forma que já não é recuperável, ou em medida tal que as tensões de rotura iniciais são demasiadamente baixas para os ritmos de construção que hoje se exigem.

Também, o sulfoaluminato de cálcio (etringite) pode vir a formar-se sem que o aluminato do cimento Portland intervenha; isto é, quando o agregado contenha alumina reactiva e o ião sulfato chegue ao contacto com ela, no meio saturado de hidróxido de cálcio, obtendo-se sulfoaluminato expansivo.

De facto, o principal inconveniente do cimento portland na resistência a certas agressões de natureza química é a elevada concentração em hidróxido de cálcio que necessita conservar no seu interior para que os principais componentes hidratados mantenham a sua estabilidade.

Assim sendo, é possível uma modificação mais importante das propriedades do cimento Portland do que a conseguida pelas alterações apresentadas da sua composição química. Essa modificação mais importante é a que deriva da utilização de ADIÇÕES (ver 3.9) tais como: pozolana, escória de alto-forno, (Coutinho, 1988), sílica de fumo, cinza de casca de arroz, xisto cozido, etc.. Aliás hoje, estes materiais são designados, segundo a NP EN 197-1 por “constituintes principais” dos cimentos correntes como o clínquer.

A utilização da maioria destes materiais adições tem muitas vantagens:

- De facto como referido, é possível alterar propriedades particulares do cimento de uma forma muito mais versátil do que por modificações na composição do clínquer Portland.
- Outra vantagem importante relacionada com a durabilidade do betão armado ou pré-esforçado, também já referida, tem a ver com o facto de algumas adições conferirem maior resistência a certas agressões de natureza química pois ao hidratarem consomem hidróxido de cálcio diminuindo o risco de formação de etringite (resultante da combinação de sulfatos com a alumina do cimento ou do agregado na presença de hidróxido de cálcio e água) e diminuindo também o risco de ataque dos álcalis à sílica reactiva do agregado (que também se verifica na presença de hidróxido de cálcio).
- Também em termos de durabilidade e, concretamente relacionado com a corrosão das armaduras, é sabido que a presença destas adições minerais no betão conduzem, em geral, a melhorias significativas da trabalhabilidade e durabilidade do betão (Mehta, 1994) armado ou pré-esforçado.
- A utilização destes materiais que, na maioria são subprodutos industriais (por ex. cinzas volantes, sílica de fumo, escórias de alto-forno) ou obtidos a partir de resíduos de agricultura (cinza de casca de arroz) valoriza-os e evita os impactes ambientais provenientes da deposição como resíduos de materiais que poluiriam a terra, a água e o ar (Mehta, 1994).
- Substituir parcialmente o clínquer Portland por adições corresponde a uma menor emissão de CO₂, que é um dos gases que contribui para o efeito de estufa e consequentes alterações climáticas.
- Substituir parcialmente o clínquer Portland por adições corresponde a menor gasto de energia uma vez que a sua preparação consome muito menos energia (ou nenhuma no caso de um subproduto) do que a consumida no fabrico do cimento.

No início do presente milénio o consumo mundial de cimento cifra-se em cerca de 1,5 biliões de ton./ano (Glass, 2001) cuja produção é responsável por uma quantidade semelhante de emissão de CO₂ para a atmosfera (Mehta, 1994) que é um dos gases responsáveis pelos conhecidos efeitos atmosféricos como o aquecimento global, redução da camada de ozono e chuvas ácidas. O consumo de cimento deverá atingir um

valor próximo de 2×10^{12} toneladas em 2010 e existem quantidades suficientes de subprodutos pozolânicos e cimentícios que podem substituir (parcialmente) o clínquer Portland, pelo que se prevê que, então, já não seja necessário aumentar a produção de clínquer Portland (Mehta, 2001).

Note-se que a emissão de CO₂ representa presentemente uma das questões ambientais mais importantes sendo que o Protocolo de Kyoto adoptado na Conferência Internacional para a Prevenção do Aquecimento Global em 1997, exigia que o Japão, EUA e UE reduzissem até 2010 as suas emissões de gases que provocam efeito de estufa em 6, 7 e 8% respectivamente, comparadas com os níveis de emissões de 1990. Embora alguns países, como reflexo do Protocolo de Kyoto, tenham começado a implementar medidas legais, os objectivos propostos não estão a ser cumpridos e as emissões de CO₂ ainda continuam a crescer (fib Bulletin 28, 2004).

3.8.1 Cimento resistente aos sulfatos

Um cimento resistente aos sulfatos é um cimento em que o aluminato tricálcico é abaixo de um dado limite ou mesmo nulo. Antigamente estes cimentos só se conseguiam obter por modificações na produção que alterassem a proporção dos constituintes principais de forma a reduzir o C₃A.

Hoje em dia os cimentos resistentes aos sulfatos são—no em graus diferentes e não são exclusivamente obtidos por modificações no fabrico do clínquer pois além do clínquer, muitos tipos destes cimentos contêm constituintes principais (adições minerais) que reduzem a quantidade do C₃A.

O clínquer em que o aluminato tricálcico se não forma é, (isto é, C₃A=0) como dito anteriormente aquele em que a alumina e o sesquióxido de ferro se encontram em proporções tais que:

$$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \leq 0,64$$

As desvantagens de um clínquer de cimento (com boa resistência aos sulfatos) com baixo teor de alumina e maior teor em óxido de ferro, é difícil de fabricar, como verificado por Michaelis em 1901, pelas razões seguintes:

- dificuldade de obter matérias-primas com pouca alumina

- dificuldades na cozedura do clínquer
- dificuldades no endurecimento do cimento

Em 1908 Fabio Ferrari retomava o estudo da fabricação deste cimento patenteando em 1919 com um método de fabrico do cimento que tinha o seu nome, designado também, por vezes, por cimento férico (Coutinho, 1988)

Hoje também se fabrica na Alemanha um cimento designado por Erz equivalente ao cimento Ferrari (Neville, 1995).

Nos Estados Unidos é fabricado um cimento com baixo teor de C_3A , designado por *cimento resistente aos sulfatos* (Tipo V, ASTM) e não pode conter mais de 5% de C_3A (Coutinho, 1988). A norma Britânica BS 4027 (1991) estabelecia para este tipo de cimento, um máximo de 3,5% de C_3A (e para o conteúdo em SO_3 , de 2,5%) (Neville, 1995).

Em Portugal, na especificação do **LNEC E 464 Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais (2005)** é referido que:

Quando a agressividade química provier da acção dos sulfatos, presentes na água ou nos solos em contacto com o betão, a composição do clínquer dos cimentos ou das correspondentes misturas deve satisfazer os limites indicados no Quadro (14) quanto à composição de clínquer de cimentos resistentes aos sulfatos. Poder-se-ão utilizar cimentos (ou misturas) não respeitando estes valores se os cimentos (ou as misturas) satisfizerem o estabelecido na Especificação LNEC E 462 após a realização do ensaio de resistência aos sulfatos nela previsto.

Quadro 14 - Composição do clínquer de cimentos resistentes aos sulfatos (E 464, 2005)

Tipo de cimento		CEM I ⁽¹⁾	CEM II ⁽²⁾	CEM III,IV,V ⁽³⁾
Teor de C_3A	XA2	≤ 5 %	≤ 8 %	≤ 10 %
	XA3	≤ 5 %	≤ 6 %	≤ 8 %
Teor de (C_3A+C_4AF)		≤ 20 %		≤ 25 %
⁽¹⁾ Aplicável também aos cimentos CEM II/A-L, II/A-LL e II/A-M ⁽²⁾ Só aplicável aos cimentos CEM II/S, II/D, II/P e II/V ⁽³⁾ Só exigível aos cimentos CEM III/A, IV/A e V/A				

No futuro e em termos de normalização europeia a Emenda A2 da EN197-1, ainda em estudo, irá incluir na EN 197-1 os **cimentos correntes** (ver 3.10) **resistentes aos sulfatos** que poderão ser 7 produtos diferentes de 3 grupos tipos principais (CEMI, CEM III e CEM IV):

CEM I...-SR 0 Cimento Portland resistente aos sulfatos (clínquer com 0% de C₃A)

CEM I ...-SR 3 Cimento Portland resistente aos sulfatos (clínquer C₃A ≤ 3%)

CEM I ...-SR 5 Cimento Portland resistente aos sulfatos (clínquer C₃A ≤ 5%)

CEM III/B...-SR S Cimento de alto forno resistente aos sulfatos

CEM III/C...-SR S Cimento de alto forno resistente aos sulfatos

CEM IV/A...-SR P Cimento pozolânico resistente aos sulfatos

CEM IV/B...-SR P Cimento pozolânico resistente aos sulfatos

Note-se que no projecto de norma daquela emenda o teor em C₃A do clínquer é calculado pela expressão seguinte:

$$C_3A = 2,65 A - 1,69 F \quad (\text{Para } C_3A=0 \rightarrow \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \leq 0,64)$$

Em que A é a percentagem de óxido de alumínio (Al₂O₃) em massa de clínquer e F é a percentagem de óxido de ferro (III) em massa de clínquer determinados de acordo com a EN 196-2.

A composição dos 7 produtos correspondentes a cimentos correntes resistentes aos sulfatos tem de estar de acordo com a composição referida na Emenda A2 que é mais exigente do que a referida na EN 197-1 e tem de respeitar requisitos adicionais também apresentados na Emenda.

Não utilização de cimento resistente aos sulfatos em **água do mar**:

Note-se que o uso de cimento resistente aos sulfatos pode ser desvantajoso quando existe o risco de presença de cloretos em betão armado ou pré-esforçado. De facto o C₃A do cimento fixa os cloretos formando cloroaluminatos (ou sal de Fridell) atrasando portanto a despassivação e corrosão das armaduras. Este é o caso em

estruturas sujeitas a água do mar que contém sulfatos potencialmente muito agressivos mas que o ataque destes é moderado pela presença de cloretos (Neville, 1995; Sousa Coutinho, 1998).

3.8.2 Cimentos de baixo calor de hidratação

O aumento de temperatura no interior do betão em massa, devido ao desenvolvimento de calor de hidratação do cimento e da baixa condutibilidade térmica do betão podem levar à fissuração deste material (Neville, 1995), como visto em 3.6.3. Assim, neste tipo de aplicações é necessário usar um cimento designado por **de baixo calor de hidratação** em que a taxa de desenvolvimento de calor é limitada.

Hoje os cimentos de baixo calor de hidratação podem ser obtidos por uso de outros constituintes principais (adições minerais) além do clínquer, embora antigamente só se obtivessem por modificações no fabrico do clínquer. Estas modificações alteravam as proporções dos constituintes principais relativamente ao clínquer Portland reduzindo as percentagens de C_3A e de C_3S tal que a soma destes constituintes rondasse os 30%. A redução dos componentes C_3S e C_3A que se hidratam mais rapidamente, tem como consequência um desenvolvimento mais lento da resistência desse cimento de baixo calor de hidratação, comparado com cimento Portland normal, mas a resistência a longo prazo não é afectado, pois exige-se que a superfície específica seja pelo menos de 320 m^2/kg (Neville, 1995) ou indirectamente, controla-se a finura através de requisitos de resistência.

Antigamente consideravam-se cimentos de baixo calor de hidratação aqueles que até aos 7 dias libertam 60 ou menos calorías por grama (250 J/g). (Os cimentos correntes portugueses chegavam a ter cerca de 80 cal/g de calor de hidratação aos 7 dias). Se a matéria prima não contivesse ferro em quantidade suficiente para a formação da fase férrica, juntava-se minério de ferro ou outros materiais ricos em ferro à matéria prima para baixar a percentagem do aluminato tricálcico e obter aluminoferrato de cálcio e ferrato de cálcio (Coutinho, 1988).

O primeiro cimento de baixo calor de hidratação produzido foi utilizado em grandes barragens de gravidade nos Estados Unidos (ASTM Tipo IV), embora agora não se produza naquele país pois consegue-se resolver o problema do desenvolvimento excessivo de calor de hidratação pelo uso de pozolanas ou cinzas volantes e uma menor dosagem de cimento de moderado calor de hidratação (Tipo II, ASTM) (Neville, 1995)

A norma inglesa BS 1370: 1979 limitava o calor de hidratação destes cimentos a 60 cal/g (250 J/g) aos 7 dias e a 70 cal/g aos 28 dias (290 J/g).

Hoje em dia os cimentos de baixo calor de hidratação são—no em graus diferentes e não são exclusivamente obtidos por modificações no fabrico do clínquer pois além do clínquer, muitos tipos destes cimentos contem constituintes principais (adições minerais) que reduzem o calor de hidratação.

De facto, na Europa, presentemente, quando há necessidade de controlar o calor de hidratação consideram-se dois grupos de cimentos:

- Os cimentos correntes de baixo calor de hidratação indicados na designação do cimento por **LH** em que o calor de hidratação não deve exceder o valor característico de 270 J/g determinado de acordo com a NP EN 196-8, aos 7 dias ou com a NP EN 196-9 às 41h. **Estes cimentos correntes de baixo calor de hidratação (LH)** foram incluídos recentemente na EN 197-1 pela emenda 1 já publicada entre nós (**NP EN 197-1:2001/A1:2005**) e
- Os **cimentos especiais de muito baixo calor de hidratação**, indicado na designação do cimento por **VLH** (<220 J/g, aos 7 dias segundo a EN 196-8) são contemplados na norma **NP EN 14216:2005**.

Os métodos de ensaio para determinar o calor de hidratação de um cimento vem especificados nas normas seguintes:

NP EN 196-8:2006 Métodos de ensaios de cimentos. Parte 8: Calor de hidratação – Método da dissolução.

NP EN 196-9:2006 Métodos de ensaio de cimentos Parte 9: Calor de hidratação – Método semi-adiabático.

3.8.3 Cimento de elevada resistência inicial

Por vezes uma das qualidades que se pretende do cimento é que possua tensões de rotura iniciais elevadas, de modo que possa ter, aos 2 dias, por exemplo, a resistência que o cimento normal possui aos 7 dias ou mesmo aos 28 dias. Assim se consegue

desmoldar mais cedo, colocar mais cedo em serviço partes das estruturas, etc.. É o que se pretende com os chamados **cimentos de elevada resistência inicial** que se obtém por meio de:

composição química adequada (aumento do C_3S)

preparação mais cuidada da matéria prima (maior finura do cru)

maior grau de cozedura, promovendo mais longa permanência no forno e subindo um pouco a temperatura e, finalmente,

(o mais importante de tudo) moendo o clínquer mais finamente.

Muitas vezes mesmo esta última medida é suficiente para obter cimento de elevada resistência inicial.

Estes cimentos, porque possuem uma fluência maior do que os cimentos normais, são mais susceptíveis de fissurar, libertando também mais calor durante a hidratação devido ao facto de possuírem componentes de maior resistência inicial (C_3S e C_3A) que são componentes que libertam mais calor durante a hidratação (Coutinho, 1988).

Note-se que a utilização de adições minerais pozolânicas ou hidráulicas latentes não terão influência nesta propriedade da resistência nas primeiras idades uma vez que estes ligantes de misturas com estes materiais demoram, em geral, mais tempo a atingir resistências equivalentes ao cimento Portland.

Os cimentos de elevada resistência inicial (classes **R**) tem que respeitar valores mínimos especificados para os 2 dias na norma NP EN 197-1, como referido em 3.7.3.

3.8.4 Cimento branco

Pode-se alterar a cor do cimento reduzindo a percentagem de óxido de ferro pois, por mero acaso, os componentes do cimento são todos brancos, e a alteração desta cor é exclusivamente devida à existência de ferro. Os cimentos com percentagens de sesquióxido de ferro inferiores a 0,2% são praticamente brancos.

Foi já referido que não existe norma europeia específica para cimentos brancos mas em Portugal existe uma norma própria:

NP 4326 (1996) Cimentos brancos. Composição, tipo, características e verificação da conformidade.

Os cimentos brancos tem de estar também de acordo com:

NP 4435:2004. Cimentos Condições de fornecimento e recepção.

Em Portugal o cimento branco é fabricado em Pataias pela SECIL.



3.9 ADIÇÕES OU SUBSTITUTOS PARCIAIS DO CIMENTO PORTLAND

Uma **adição** é um material inorgânico finamente dividido (de finura menor ou igual à do cimento) que pode ser adicionado ao betão na amassadura com a finalidade de melhorar certas propriedades ou para adquirir propriedades especiais.

Existem dois tipos de adições:

■ **Tipo I** → adições quase inertes. Ex:

Filer calcário - LNEC E 466, 2005. FÍLERES CALCÁRIOS PARA LIGANTES HIDRÁULICOS. Características e requisitos de conformidade.

■ **Tipo II** → adições hidráulicas latentes. Ex:

Escórias de alto forno, adição presentemente regulamentada pela especificação do **LNEC E375:1993 - Escória granulada de alto forno moída para betões. Características e verificação da conformidade.** Em breve as escórias serão cobertas pelas normas:

EN 15167-1 (FINAL DRAFT pr, 2006) Ground granulated blast furnace slag for use in concrete, mortar and grout - Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria (*harmonizada*).

EN 15167-2 (DRAFT pr, 2005) Ground granulated blast furnace slag for use in concrete, mortar and grout - Part 2: Conformity evaluation.

■ **Tipo II** → adições com propriedades pozolânicas. Exs:

Pozolana natural - NP 4220:1993 – Pozolanas para betão. Definições, especificações e verificação da conformidade.

Cinza volante –

NP EN 450-1:2006 – Cinzas volantes para betão. Definições, exigências e controlo da qualidade (*harmonizada*).

NP EN 450-2:2006 – Cinzas volantes para betão. Avaliação da conformidade.

Sílica de fumo -

NP EN 13263-1:2006 Sílica de fumo para betão. Parte 1: Definições requisitos e critérios de conformidade (*harmonizada*).

NP EN 13263-2:2006 Sílica de fumo para betão. Parte 2: Avaliação da conformidade.

Estes materiais podem vir já de fábrica incorporados com cimento Portland constituindo os 27 produtos da família de cimentos correntes (ver 3.10) de acordo com a NP EN 197-1 (Nesta situação em rigor não se utiliza o termo “adição” para designar estes materiais, mas sim constituintes principais como o clínquer).

Em seguida são descritas propriedades das adições/constituintes principais mais importantes.

3.9.1 Fileres e filer calcário (L, LL). Cimentos Portland de calcário (CEM II-L e LL)

3.9.1.1 Definição e características

Um filer é um material finamente moído com finura sensivelmente idêntica à do cimento Portland e que devido às suas propriedades físicas tem um efeito benéfico em algumas propriedades do betão, tais como na:

Trabalhabilidade

Densidade

Permeabilidade

Capilaridade

Exsudação e

Tendência para a fissuração.

Os fileres podem melhorar a hidratação do cimento Portland na medida em que funcionam como centros de nucleação das reacções.

Em geral os fileres são inertes do ponto de vista químico e terão de estar de acordo com a NP EN 12620:2004 para serem utilizados em betão. É de referir que, no entanto, ultimamente alguns cientistas pensam que os fileres **calcários** possam contribuir para uma das formas, recentemente descobertas, de ataque do betão por sulfatos com formação de taumasite (Sousa Coutinho, 2001).

O filer mais utilizado é, na realidade, o filer calcário – Figura 58. Se suficientemente moído (s.e.> 500 m²/kg, Blaine) e devidamente misturado no cimento, o filer calcário pode ser



Figura 58 – Filer calcário (à direita) (Secil).

usado para reduzir a dosagem de água devido a melhoria da granulometria do total das partículas a incorporar no betão (Jackson, 1998).

3.9.1.2 Regulamentação

Em termos de regulamentação em Portugal, tem-se o seguinte:

■ Para o filer como **constituente principal** do ligante considera-se portanto a **NP EN 197-1** que como vimos, define os respectivos requisitos e apresenta as proporções em que deve ser considerada como substituto parcial do clínquer, portanto, nos cimentos comercializados (ver 3.10). De facto aquela norma prevê a sua utilização até 5% em qualquer cimento e até 35% se em conjunto com apenas clínquer Portland, constituindo os cimentos Portland de calcário (CEM II/A-L, CEMII/B-L, CEM II/A-LL, CEM II/B-LL). O filer calcário incorporado nos cimentos correntes obedece aos seguintes requisitos, de acordo com a NP EN 197-1:

O teor de carbonato de cálcio (CaCO_3), calculado a partir do teor de óxido de cálcio, deve ser pelo menos 75 % em massa.

O teor de argila, determinado pelo ensaio do azul de metileno, segundo a NP EN 933-9, não deve exceder 1,20 g/100 g. (Para este ensaio, o calcário deve ser finamente moído a uma finura de aproximadamente 500 m^2/kg determinada como superfície específica segundo a NP EN 196-6, ^{Blaine}).

O teor de carbono orgânico total (TOC), quando ensaiado de acordo com o pr EN 13639: 1999, deve estar conforme com um dos seguintes critérios:

- LL: não deve exceder 0,20 % em massa;

- L: não deve exceder 0,50 % em massa (NP EN 197-1, 2001).

Note-se que o teor de carbono orgânico total (TOC) tem a ver com a matéria orgânica presente.

■ Para o filer calcário como **adição** (acrescentado na amassadura do betão) para melhorar a granulometria dos finos, tem de obedecer a especificação LNEC E 466, 2005. FÍLERES CALCÁRIOS PARA LIGANTES HIDRÁULICOS. Características e requisitos de conformidade, onde são consideradas 4 classes (A e D) de acordo com a s.e. (Blaine) de 200 a mais de 600 m^2/kg . embora aquela especificação passe a ser substituída pelas normas EN 15167-1 e EN 15167-2 logo que publicadas entre nós.

3.9.2 Escória de Alto Forno. Cimentos Portland de escória (CEM II-S) e cimentos de alto forno (CEM III)

As adições tipo II, ou materiais que substituem parcialmente o cimento Portland, podem ter **propriedades hidráulicas latentes** ou então **propriedades pozolânicas**.

3.9.2.1 Propriedades hidráulicas latentes

Um material com **propriedades hidráulicas latentes**, por exemplo as escórias de alto forno (slag ou ggbs) é um material que permite a formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, isto é, são verdadeiros cimentos, mas reagem com extrema lentidão quando usados isoladamente e portanto sem aplicação prática. A activação pode ser feita pela junção de soda ou potassa caustica (álcalis), cal, silicato de sódio ou mesmo de cimento portland pois o pH sobe para um valor de 12 (ou mais) activando as reacções de hidratação das escórias. A hidratação do cimento produz, como se sabe, uma grande quantidade de hidróxido de cálcio.

3.9.2.2 Escória - Definição e características

A escória de alto forno é um subproduto do fabrico do ferro fundido.

De facto o minério de ferro é constituído por uma mistura de óxidos de ferro (dos quais a hematite e a magnetite são os principais) com outras substâncias ricas em cálcio, silício e alumínio. O minério de ferro, carvão e um fundente (em geral calcário) são lançados na parte superior do alto forno. Esta mistura vai descendo lentamente e aquecendo, até à zona de fusão onde atinge temperaturas da ordem dos 1500°C.

Na parte inferior do alto forno recolhem-se duas substâncias com densidades diferentes, o ferro fundido e um material mais leve designado por escória (Coutinho, 1988).

A escória é portanto um subproduto industrial, produzindo-se cerca de 300 kg para cada tonelada de ferro e consiste numa mistura de OCa , SiO_2 e Al_2O_3 , isto é, os mesmos óxidos que compõem o cimento Portland, mas em proporções diferentes (Neville, 1995).

A escória tem várias aplicações tais como:

- agregados para betão ou estradas
- matéria prima para produção de agregados leves para betão (escórias expandidas)
- lã de escória para isolamentos térmicos
- indústria do cimento: como matéria prima para fabricar cimento (adicionado ao calcário e entrando no forno para produzir clínquer) (Coutinho, 1988)
 - como material cimentício moído com determinada finura e usado com um reactivador, como já referido. É utilizado por exemplo em argamassas de assentamento de alvenaria (Neville, 1995)
 - como *adição ou substituto parcial do cimento* (Coutinho, 1988).

Note-se que nem todas as escórias são adequadas para adicionar ao cimento e apenas servem para esse fim as que tem uma estrutura física apropriada e uma composição química média dentro dos limites seguintes (em massa):

Segundo a NP EN 197-1 a escória granulada de alto forno a utilizar nos cimentos resulta do arrefecimento rápido de uma escória fundida de composição apropriada, obtida da fusão do minério de ferro num alto forno e contém pelo menos dois terços em massa de escória vitrificada e possui propriedades hidráulicas quando activada apropriadamente. A escória granulada de alto forno deve ser constituída por pelo menos dois terços em massa da soma de óxido de cálcio (CaO), de óxido de magnésio (MgO) e de dióxido de silício (SiO₂). O restante contém óxido de alumínio (Al₂O₃), juntamente com pequenas quantidades de outros compostos. A relação em massa CaO+MgO/SiO₂ deve exceder 1,0 (NP EN 197-1).

O óxido de magnésio presente não é cristalino pelo que não oferece problemas. A massa volúmica é cerca de 2.9 g/cm³ pelo que a massa volúmica de cimentos com escória é um pouco mais baixa que o cimento portland (~3.1 g/cm³) (Coutinho, 1988, LNEC E 375, 1993; Neville, 1995). Na Figura 59 apresenta-se uma fotografia de escória.

Em termos físicos deve encontrar-se no estado amorfo (>66%, segundo LNEC E 375, 1993), o que se consegue na prática, através de um arrefecimento rápido desde o estado de fusão (1500°C) até à temperatura normal o que se faz por lançamento em tanques de água fria processo designado por granulação (Coutinho, 1988).



Figura 59 – Escória (Secil).

A partir de 1970 começou a usar-se também um processo mais eficaz, designado por peletização, em que a escória em fusão é expandida por tratamento por injeção de água e passada por uma roda dentada que projecta o material em pequenas partículas arrefecidas por jactos de água – Figura 60 (Malhotra, 1997).

A escória obtida por este processo contém menos água (Coutinho, 1988).

A escória granulada de peletização é depois moída de modo a ter uma finura superior a $2750 \text{ cm}^2/\text{g}$, no caso de ser usada como adição. Pode ser moída em conjunto com o clínquer nos cimentos de escória ou adicionada no final da moagem do clínquer.

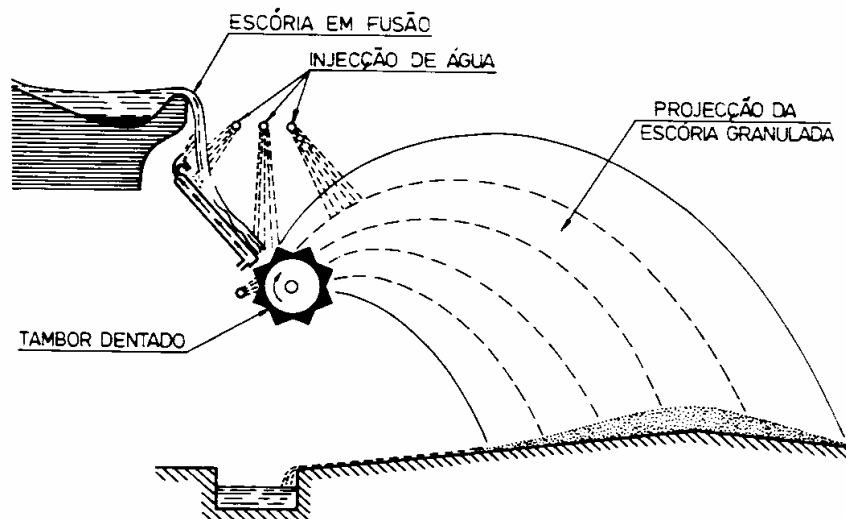


Figura 60 – Peletização da escória fundida. A escória fundida é expandida por injeção de água, cai sobre a roda dentada que a projecta em partículas arrefecidas por jactos de água (Coutinho, 1988).

Existe também um processo de utilização de escória designado por processo Trieff (Bélgica) em que a escória ainda molhada é moída e armazenada em pasta para depois ser aplicada como adição ao betão, na amassadura, juntamente com cimento Portland. O custo de secagem é assim evitado e além disso a moagem em meio húmido é mais eficaz obtendo-se um produto mais fino (Coutinho, 1988, Neville, 1995).

3.9.2.3 Regulamentação

Em termos de regulamentação, em Portugal, tem-se o seguinte:

Para as escórias como *constituente principal* do ligante considera-se a **NP EN 197-1** que define escória e que apresenta as proporções em que deve ser considerada como substituto parcial do cimento, portanto, nos cimentos comercializados (ver 3.10). A escória utiliza-se nos cimentos correntes em proporções de 6 a 95% (NP EN 197-1, 2001) e como referido as propriedades hidráulicas aparecem se em presença de meio altamente alcalino.

Os cimentos referidos na NP EN 197-1 (2001) Portland de escória (CEM II/A-S e CEM II/B-S) podem conter de 6 a 35% de escória de alto forno, contendo sempre pelo menos 65% de clínquer Portland. Os cimentos de alto forno, CEM III, referidos também na NP EN 197-1 são cimentos que contêm mais de 35% de escória de alto forno, podendo conter até 95% deste material com propriedades hidráulicas latentes e contêm sempre clínquer Portland (de 5 a 64%) (CEM III/A, CEM III/B e CEM III/C).

■ Para as escórias como *adição* (na altura da amassadura do betão) considera-se a especificação **LNEC E 464 (2005). Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais** que refere as condições em que as escórias podem ser utilizadas e estabelece a aptidão duma dada mistura, incluindo por ex. escórias, para ser constituinte do betão. As escórias terão de estar de acordo com a especificação do **LNEC E 375 Escória granulada de alto forno moída para betões. Características e verificação de conformidade (1993)** que estabelece as respectivas exigências embora aquela especificação passe a ser substituída pelas normas **EN 15167-1 e EN 15167-2** logo que publicadas entre nós.

3.9.2.4 Vantagens do uso de escórias

A utilização de escória como adição ou substituto parcial do cimento Portland corresponde não só à utilização de um subproduto industrial, com todas as vantagens

que daí advém em termos ambientais, como implica uma economia de combustível (cerca de 200 kg de carvão em média por cada tonelada de clínquer substituído por uma tonelada de escória segundo Coutinho, 1988).

Os produtos da hidratação da escória são semelhantes aos produzidos na hidratação do cimento Portland com a diferença de que não se produz hidróxido de cálcio (Soroka, 1993). Esta ausência é importante pelo facto de não conduzir a soluções sobressaturadas de hidróxido de cálcio no interior (Coutinho, 1988), condição essencial à degradação do betão como visto anteriormente, por:

- ataque por sulfatos aos aluminatos do cimento ou alumina do agregado, formando-se etringite com expansões.
- ataque por álcalis à sílica reactiva dos agregados.

Isto é, nestas condições o cimento de escórias é eficaz em termos de durabilidade.

No caso de teores elevados de escória (>50%) não se formam os produtos de hidratação do C_3A que se encontram no cimento Portland mas sim um aluminato bicálcico hidratado, o que faz com que estes cimentos com elevado teor de escórias tenham elevada resistência química (Coutinho, 1988).

Na Figura 61 apresenta-se o efeito da substituição de cimento Portland por escória (de 40 a 65%) que reduz consideravelmente a expansão provocada por reacção álcalis-silica reactiva do agregado (Soroka, 1993). Na Figura 62 é apresentado o efeito da substituição crescente por escórias na resistência à penetração de cloretos em betão.

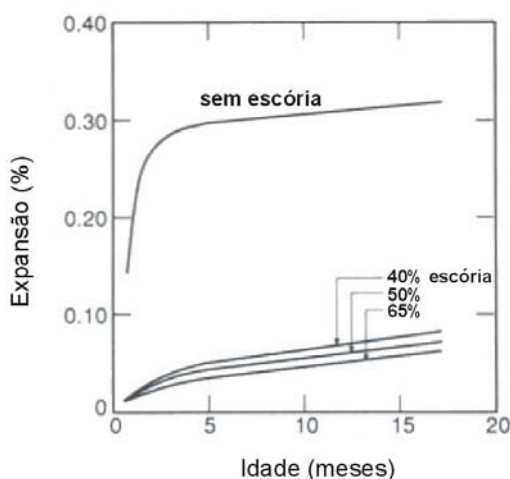


Figura 61 – Efeito da substituição de cimento Portland com escória granulada de alto forno na expansão provocada por reacção álcalis-agregado observada em provetes de argamassa (Soroka, 1993).

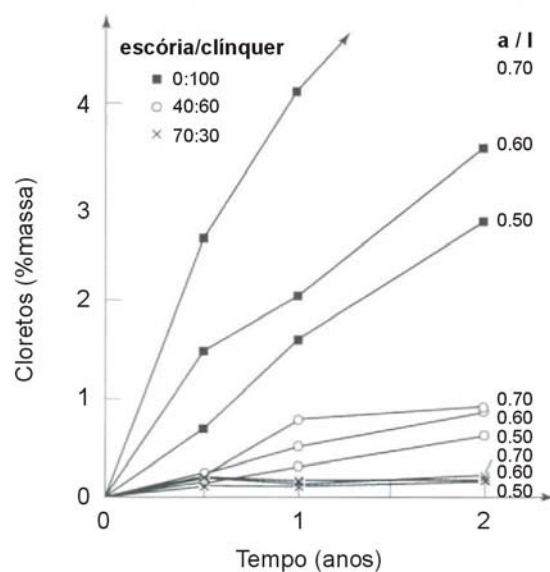


Figura 62 – Difusão de cloretos em prismas de betão (Regourd, 1998).

3.9.3 Pozolanas. Actividade pozolânica. Classificação das pozolanas

As pozolanas são substâncias naturais ou artificiais de composição siliciosa (SiO_2) ou silico-aluminosa (SiO_2 e Al_2O_3) e adicionalmente óxido de ferro (Fe_2O_3) e outros óxidos. As pozolanas não endurecem, por si próprios quando misturados com água, mas, quando finamente moídos e na presença de água, reagem à temperatura ambiente normal com o hidróxido de cálcio dissolvido ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para formarem compostos de silicato e aluminato de cálcio desenvolvendo resistência. Estes compostos são similares àqueles que são formados no endurecimento dos materiais hidráulicos.

Isto é, em termos de composição os materiais pozolânicos são compostos por:

SiO_2 (> 25% em massa) + Al_2O_3

e ainda Fe_2O_3

CaO (reactivo) <<

etc

Portanto uma pozolana reage com hidróxido de cálcio formando gel C-S-H mas estes compostos hidratados não são tão ricos em cálcio como os obtidos na hidratação do cimento Portland, não necessitando de contacto com soluções sobressaturadas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Coutinho, 1988; Soroka, 1993).

Para que haja reactividade pozolânica, isto é, capacidade de o material se combinar com o hidróxido de cálcio, é necessário que a sílica e a alumina não estejam em elevado grau de cristalinidade: por exemplo o quartzo é perfeitamente inerte. A reactividade da pozolana está portanto ligada à sua estrutura interna: ela será tanto maior quanto mais afastado estiver do estado cristalino.

Como a reacção entre a pozolana e a cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) se realiza com um dos componentes – a pozolana – no estado sólido, o estado da sua superfície é determinante para o início da reacção. Além disso é necessário que a área superficial em contacto com o outro reagente – o hidróxido de cálcio que se encontra dissolvido – seja a maior possível. Assim, é habitual que a superfície específica destes materiais atinja valores duplos ou triplos dos do cimento, isto é de 600 a 1000 m^2/kg (Coutinho, 1988).

Em termos de classificação as pozolanas podem ser:

■	Naturais	}	Rochas lávicas meteorizadas	P
			diatomite	P
■	Artificiais	→	Argilas/xistos termicamente activados (ex:metacaulino)	Q,T
■	Subprodutos industriais	}	Cinza volante calcária	W
			Cinza volante siliciosa	V
			Sílica de fumo	D
■	Subprodutos da agricultura	→	Cinza de casca de arroz	

A grande vantagem de utilização de pozolanas, nomeadamente dos cimentos pozolânicos (D,P,Q,V,W) (ver 3.10) é a redução da taxa de desenvolvimento de calor durante a hidratação – ver Figura 64, pelo que estes cimentos são cimentos de baixo calor de hidratação. Além desta vantagem o cimento pozolânico oferece alguma resistência ao ataque por sulfatos e ao ataque por ácidos fracos (Neville, 1995).

3.9.4 Pozolanas naturais

As pozolanas **naturais** são provenientes de magmas geralmente ácidos, isto é ricos em sílica, que solidificaram rapidamente durante uma erupção e que ficaram no estado amorfo, ou cripto-cristalino. A reactividade pozolânica é ainda aumentada depois de esta lava se ter meteorizado (Coutinho, 1988).

Em geral o processamento destes materiais resume-se a britagem, moagem e peneiração.

Além das rochas lávicas tais como cinzas vulcânicas e depósitos de lava, existe outro tipo de pozolanas naturais constituído por diatomite (Soroka, 1993).

Na Madeira, nos Açores e em Cabo Verde existem pozolanas naturais.

Em Itália existem vários tipos de pozolanas naturais, usadas já desde os tempos dos Romanos. Na Figura 63 apresenta-se uma fotografia SEM de uma pozolana italiana e na Figura 64 o efeito da substituição parcial do cimento por pozolana natural italiana no calor de hidratação (Soroka, 1993).

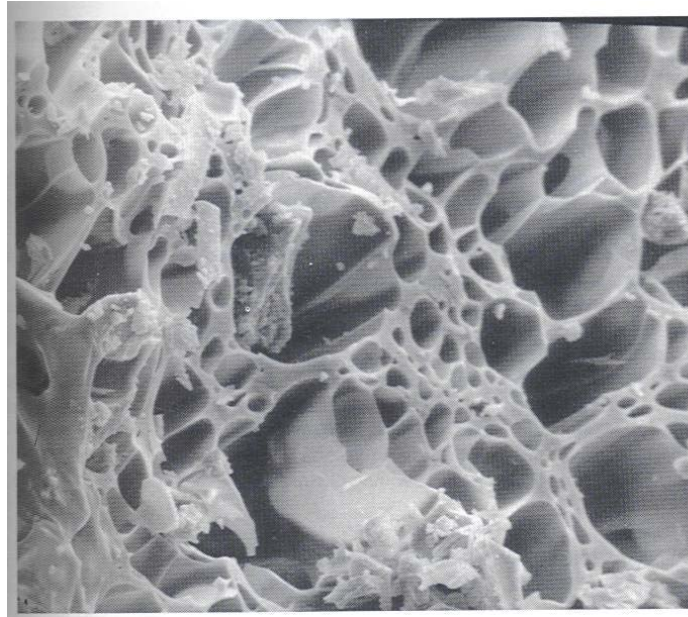


Figura 63 – Foto SEM (Microscopia electrónica de varrimento) de uma pozolana de Bacoli (Itália) aumentada 600 vezes (Massazza, 1998)

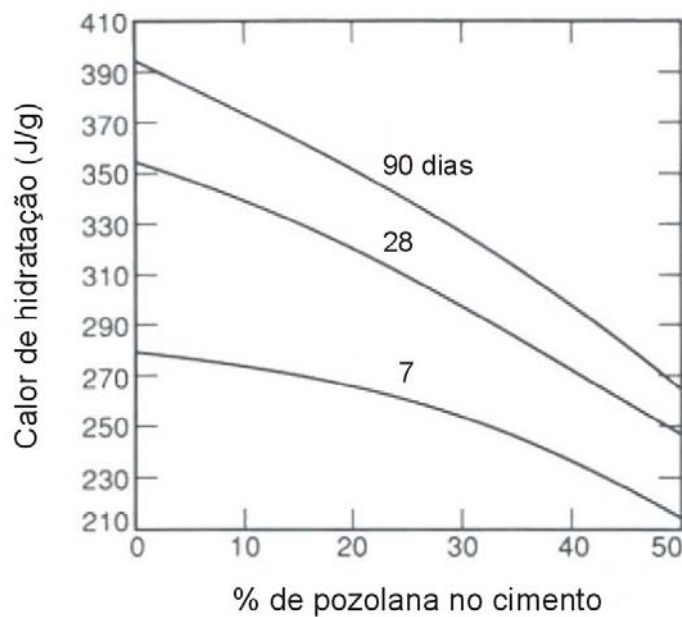


Figura 64 – Efeito da substituição parcial do cimento por pozolana natural italiana no calor de hidratação (Soroka, 1993).

3.9.5 Pozolanas artificiais

Quanto às pozolanas **artificiais** as argilas ou xistos naturais não exibem à partida propriedades pozolânicas, mas quando aquecidas a temperaturas entre 500 e 900°C passam a ter propriedades pozolânicas (Soroka, 1993; NP EN 197-1)

A NP EN 197-1 considera dois tipos de pozolanas artificiais:

Pozolana natural calcinada (Q)

Pozolanas naturais calcinadas são materiais de origem vulcânica, argilas, xistos ou rochas sedimentares, activados por tratamento térmico.

Xisto cozido (T)

O xisto cozido, especificamente xisto betuminoso cozido, é produzido num forno especial a temperaturas de cerca de 800 °C. Devido à composição do material natural e ao processo de produção, o xisto cozido contém fases de clínquer, principalmente silicato bicálcico e aluminato monocálcio. Também contém, além de pequenas quantidades de óxido de cálcio livre e de sulfato de cálcio, maiores quantidades de óxidos que reagem pozolanicamente, especialmente dióxido de silício. Consequentemente, quando finamente moído, o xisto cozido revela acentuadas propriedades hidráulicas como o cimento Portland e, complementarmente, propriedades pozolânicas.

O xisto cozido adequadamente moído deve ter uma resistência à compressão de pelo menos 25,0 MPa aos 28 dias, quando ensaiado de acordo com a NP EN 196-1. A argamassa de ensaio deve ser preparada somente com xisto cozido finamente moído, em vez de cimento. Os provetes de argamassa devem ser desmoldados 48 horas depois da preparação e curados num ambiente húmido, de humidade relativa de pelo menos 90 % durante o ensaio.

A expansão (expansibilidade) do xisto cozido não deve exceder 10 mm, quando ensaiado segundo a NP EN 196-3 usando uma mistura de 30 % em massa de xisto cozido moído e 70 % em massa de um cimento CEM I conforme com a NP EN 197-1.

Se o teor de sulfato (SO_3) do xisto cozido exceder o limite superior admissível para o teor de sulfato do cimento, então esta situação tem de ser tida em conta para o fabrico do cimento, por redução apropriada dos constituintes que contêm sulfato de cálcio (NP EN 197-1, 2001).

Das pozolanas naturais calcinadas salienta-se o metacaulino que é obtido por calcinação de argila caulinítica a uma temperatura entre 650 a 850°C e posterior moagem, até se obter uma finura de cerca de 700 a 900 m²/kg (Neville, 1995) O

metacaulino como substituto parcial do cimento, contribui para a durabilidade do betão (Sampaio, Sousa Coutinho e Sampaio, 2001; Sousa, 2005).

3.9.6 Cinza volante

3.9.6.1 Definição e características

A cinza volante é um subproduto industrial obtido por captação das poeiras dos gases de combustão das fornalhas alimentadas com carvão pulverizado. De facto o carvão tem impurezas tais como argila, quartzo e calcário e durante a combustão estas impurezas fundem e depois solidificam em pequenas esferas de matéria amorfa. A maioria das partículas são arrastadas pelo fluxo de gás de combustão e mais tarde são retidas em precipitadores electrostáticos ou separação mecânica. Na Figura 65 apresenta-se uma foto ampliada de cinza volante.

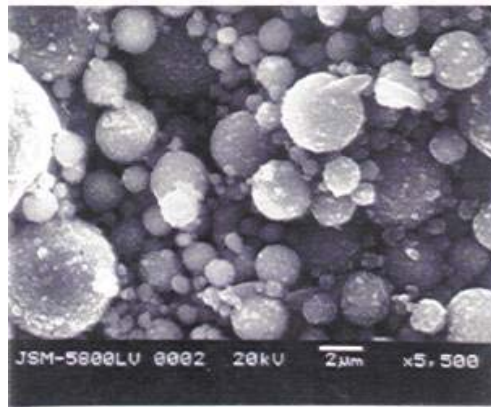


Figura 65 – Cinzas volantes aumentada 5500 vezes (MBInc.).

Em geral a cinza volante é constituída por matéria amorfa de silicatos de cálcio alumínio e álcalis. A composição exacta é muito variável sendo muito importante o conteúdo em CaO. Nem todos os tipos de cinza são adequados ao fabrico de betão, mas os que são contém sobretudo SiO₂ (mínimo 25% em massa) e Al₂O₃ e subdividem-se em dois grupos de acordo com o teor em CaO:

- cinza volante siliciosa (CaO < 10%) → (propriedades pozolânicas)
- cinza volante calcária (CaO > 10%, em geral 15-35%) (propriedades pozolânicas e hidráulicas latentes)

Esta diferença de composição em termos de conteúdo de CaO reflecte-se nas propriedades das cinzas. Na realidade uma cinza volante calcária, além das propriedades pozolânicas pode ter também propriedades hidráulicas (NP EN 197-1, 2001, Soroka, 1993, NP EN 450-1, 2006).

As partículas das cinzas são esféricas, o que é vantajoso do ponto de vista de quantidade de água de amassadura e a maioria das partículas tem dimensões de menos de 1 a 100µm sendo a s.e. entre 250 e 600 m²/kg (Blaine). O facto de ter uma s.e. elevada significa uma disponibilidade imediata para reacção com o hidróxido de cálcio. A massa volúmica é em média 2.35 kg/dm³ (Neville, 1995).

Apresentam-se as definições de cinza volante (V, W), cinza volante siliciosa (V) e cinza volante calcária (W) de acordo com a NP EN 197-1 (2001) portanto a incluir nos cimentos:

Cinzas volantes (V, W) Generalidades

A cinza volante é obtida por precipitação electrostática ou mecânica de poeira sob a forma de partículas, dos gases de combustão de fornalhas aquecidas com carvão pulverizado. A cinza obtida por outros métodos não deve ser usada no cimento conforme com a NP EN 197-1.

A cinza volante pode ser de natureza siliciosa ou calcária. A primeira tem propriedades pozolânicas; a segunda pode ter, complementarmente, propriedades hidráulicas. A perda ao fogo da cinza volante determinada de acordo com a NP EN 196-2, mas usando um tempo de calcinação de 1h, não deve exceder 5,0 % em massa.

A cinza volante com perda ao fogo de 5,0 % a 7,0 % em massa também pode ser aceite, desde que os requisitos particulares para a durabilidade, especialmente a resistência ao gelo, e para a compatibilidade com adjuvantes se encontrem de acordo com normas ou regulamentos válidos para betão ou argamassa no local de aplicação.

No caso de cinza volante com uma perda ao fogo entre 5,0 % e 7,0 % em massa, o limite máximo, 7,0%, deve ser mencionado na embalagem e/ou na guia de remessa.

Cinza volante siliciosa (V)

A cinza volante siliciosa é um pó fino principalmente formado de partículas esféricas com propriedades pozolânicas. É constituída essencialmente por dióxido de silício (SiO₂) e por óxido de alumínio (Al₂O₃). O restante contém óxido de ferro (Fe₂O₃) e outros compostos.

A percentagem de óxido de cálcio reactivo deve ser menor do que 10,0 % em massa, o teor de óxido de cálcio livre, determinado pelo método descrito na NP EN 451-1 não deve exceder 1,0 % em massa. A cinza volante com teor de óxido de cálcio

livre maior que 1,0 % em massa, mas inferior a 2,5 % em massa, é também aceitável desde que o requisito quanto à expansão (expansibilidade) não exceda 10 mm, quando ensaiado segundo a NP EN 196-3, usando uma mistura de 30 % em massa de cinza volante siliciosa e 70 % em massa de um cimento CEM I conforme com a NP EN 197-1.

O teor de dióxido de silício reactivo não deve ser inferior a 25 % em massa.

Cinza volante calcária (W)

A cinza volante calcária é um pó fino, com propriedades hidráulicas e ou pozolânicas. É constituída essencialmente por óxido de cálcio reactivo (CaO), por dióxido de silício reactivo (SiO₂) e por óxido de alumínio (Al₂O₃). O restante contém óxido de ferro (Fe₂O₃) e outros compostos. A percentagem por óxido de cálcio reactivo não deve ser inferior a 10,0 % em massa. A cinza volante calcária que contém entre 10,0 % e 15,0 % em massa de óxido de cálcio reactivo não deve conter menos do que 25,0 % em massa de dióxido de silício reactivo.

A cinza volante calcária adequadamente moída contendo mais do que 15,0 % em massa de óxido de cálcio reactivo, deve ter uma resistência à compressão de pelo menos 10,0 MPa aos 28 dias, quando ensaiada segundo a NP EN 196-1. Antes do ensaio, a cinza volante deve ser moída e a finura, expressa como a percentagem em massa da cinza retida por crivagem húmida no crivo de 40 µm de malha, deve estar entre 10 % e 30 % em massa. O ensaio da argamassa deve ser preparado apenas com cinza volante calcária moída, em vez de cimento. Os provetes de argamassa devem ser desmoldados 48 horas depois da preparação e então curados num ambiente húmido, de humidade relativa de pelo menos 90% durante o ensaio. A expansão (expansibilidade) da cinza volante calcária não deve exceder 10 mm, quando ensaiada segundo a NP EN 196-3, usando uma mistura de 30 % em massa de cinza volante calcária moída, como descrito acima e 70 % em massa de um cimento CEM I conforme com a NP EN 197-1.

Se o teor de sulfato (SO₃) da cinza volante exceder o limite superior admissível para o teor de sulfato do cimento, então esta situação tem de ser levada em conta para o fabrico do cimento, por redução apropriada dos constituintes que contêm sulfato de cálcio (NP EN 197-1).

3.9.6.2 Regulamentação

■ Para a cinza volante (siliciosa – V; calcária – W) como *constituente principal* do ligante considera-se a **NP EN 197-1** em que a cinza é utilizada de 6 a 35% no CEM II (CEM II/A-V; CEM II/B-V; CEM II/A-W; CEM II/B-W , CEM II/A-M; CEM II/B-M) e pode ser constituinte no CEM IV e CEM V (ver 3.10).

■ Para a cinza volante como *adição* (na altura da amassadura do betão) considera-se a especificação **LNEC E 464 (2005). Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais** que refere as condições em que a cinza volante pode ser utilizadas e estabelece a aptidão duma dada mistura, incluindo por ex. a cinza volante para ser constituinte do betão. A cinza volante tem de estar de acordo com as normas europeias já publicadas entre nós (ver Quadro 15):

NP EN 450-1:2006 Cinzas volantes para betão. Definições, especificações e controlo da qualidade. (harmonizada)

NP EN 450-2:2006 Cinzas volantes para betão. Avaliação da conformidade

3.9.7 Sílica de fumo

3.9.8.1 Definição, características e vantagens

A sílica de fumo é um subproduto da preparação do metal silício ou de ligas de silício, especialmente de ferro-silício, em fornos eléctricos de arco, onde o quartzo é reduzido pelo carvão, a elevadas temperaturas (cerca de 2000°C).

As matérias primas introduzidas no forno para fabrico do silício são constituídas por quartzo, carvão e pedaços de madeira. As reacções químicas que têm lugar são complexas, mas uma delas envolve a formação de um gás – monóxido de silício (SiO), que se oxida formando SiO₂ e condensa em pequenas esferas de sílica amorfa. Estas partículas são arrastadas nos gases de escape e captadas em filtros de saco, antes da sua saída para a atmosfera, obtendo-se assim a designada sílica de fumo ou microssílica (Coutinho, 1988; Soroka, 1993).

Na Figura 66 apresenta-se um esquema do processo de produção de sílica de fumo e nas Figuras 67 e 68 apresentam-se fotografias, respectivamente, do edifício do forno e do edifício dos filtros no processamento de sílica de fumo.

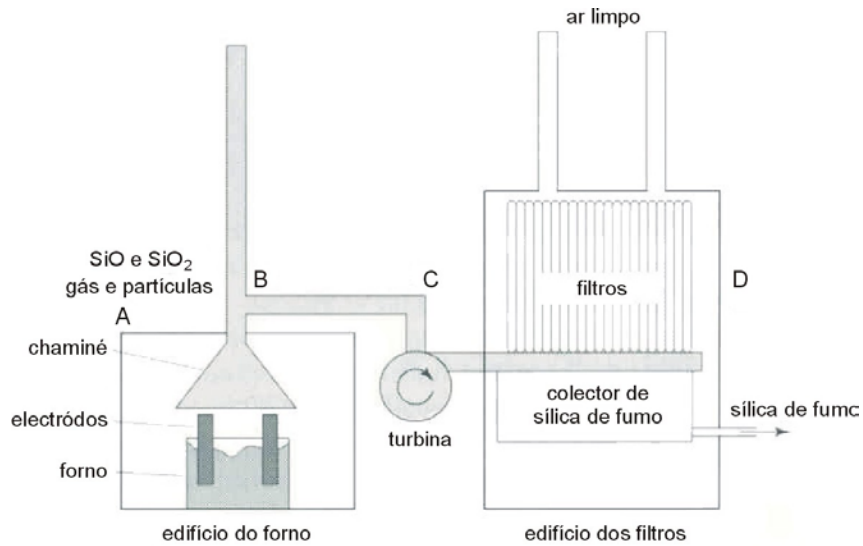


Figura 66 – Esquema do processo de produção de sílica de fumo numa central de produção do metal silício ou ligas de silício (Fidjestöl e Lewis, 1998).



Figura 67 – Fotografia do edifício dos filtros na produção de sílica de fumo (Fidjestöl e Lewis, 1998)



Figura 68 – Fotografia do edifício dos filtros na produção de sílica de fumo (Fidjestöl e Lewis, 1998)

As primeiras experiências do uso da sílica de fumo no fabrico de betão foram realizadas na Noruega, por volta de 1950, e depois na Islândia e no Canadá, em 1970. Seis anos mais tarde foi publicada a primeira norma sobre a adição de sílica de fumo ao cimento, mas a sua utilização só se começou a generalizar no início dos anos 80, nomeadamente nos países da América do Norte (Coutinho, 1988).

A sílica de fumo é constituída fundamentalmente por SiO_2 , cuja percentagem é superior a 90% no caso da produção do silício, e por pequenas quantidades de óxidos de alumínio, ferro, cálcio, magnésio, etc., em percentagens normalmente inferiores a 1%. A proporção relativa destes compostos varia de acordo com a liga metálica que se está a produzir, podendo a percentagem de dióxido de silício diminuir para cerca de 80%, na fabricação de algumas ligas de ferro-silício, ou para 50%, quando se produz cálcio-silício (Coutinho, 1988).

O diâmetro das partículas varia entre 0,01 e 0,5 μm , com um valor médio próximo de 0,1 μm , o qual é cerca de 100 vezes inferior ao do cimento portland. A superfície específica é elevada, medida por adsorção do nitrogénio que varia de 15000 a 25000 m^2/kg (Coutinho, 1988; Fidjestøl e Lewis, 1998). Na Figura 69 apresenta-se uma fotografia mostrando partículas individuais de sílica.

As partículas individuais de sílica de fumo muitas vezes agrupam-se formando aglomerados de partículas soltas.

Na Figura 70 apresentam-se curvas de distribuição de 3 tipos de sílica de fumo e na Figura 71 apresenta-se a comparação de curvas granulométricas de cimento Portland, cinza volante calcária e siliciosa e sílica de fumo.

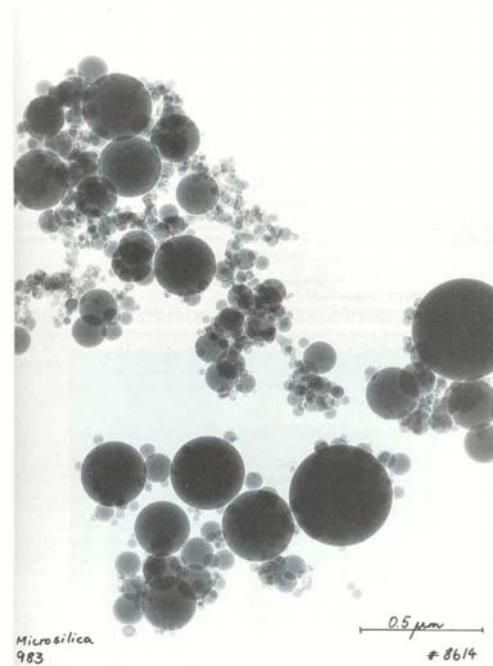


Figura 69– Fotografia (microscopia electrónica de transmissão) mostrando partículas individuais de sílica de fumo ((Fidjestøl e Lewis, 1998)

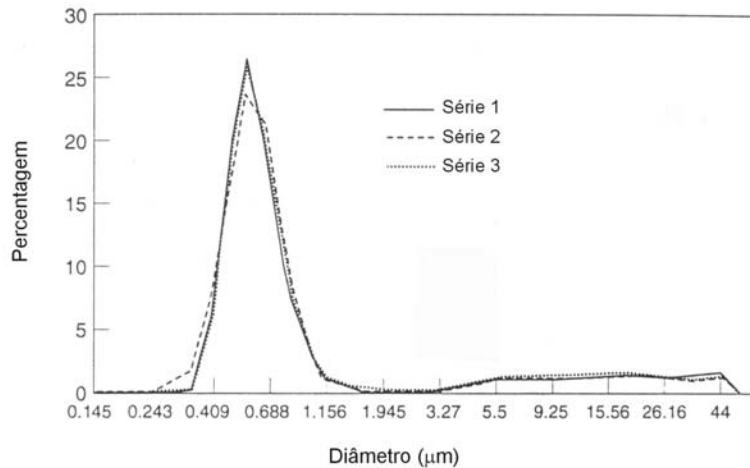


Figura 70 – Granulometria de 3 tipos de sílica de fumo. Os grãos aqui representados são aglomerados e não partículas ((Fidjestöl e Lewis, 1998)

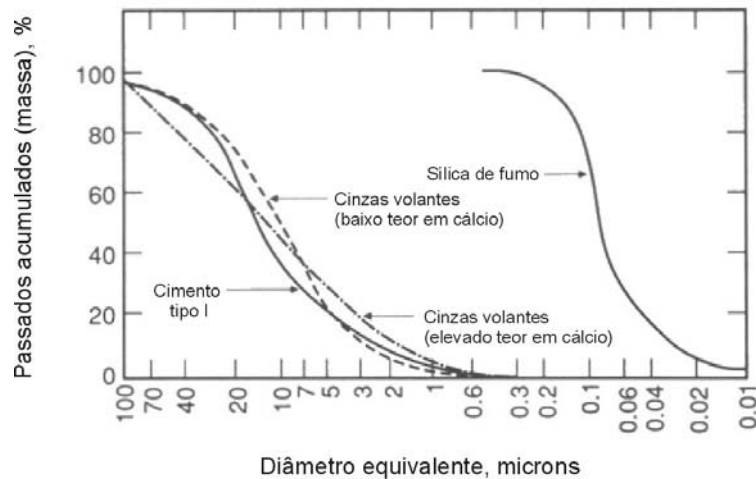


Figura 71– Comparação de curvas granulométricas do cimento Portland, cinza volante calcária e siliciosa e sílica de fumo (Soroka, 1993)

A massa volúmica é da ordem dos $2,2 \text{ g/cm}^3$, podendo no entanto aumentar para $3,0 \text{ g/cm}^3$, no caso do fabrico de ligas de silício e manganês. A baridade da sílica de fumo proveniente da preparação do silício é cerca de 250 kg/m^3 , o que origina dificuldades no seu transporte e manuseamento.

3.9.7.2 Efeitos da sílica de fumo

O facto de a s.e. ser muito elevada e o teor em SiO_2 ser muito alto faz com que as reacções pozolánicas acelerem aos primeiros dias. O facto de as partículas serem microscópicas a sílica de fumo produz um efeito de filer na pasta de cimento como se pode observar no esquema da Figura 72. Para a mesma razão água/sólidos, a amassadura, a porosidade inicial, isto é, a fracção volúmica ocupada por água, é a mesmo nos dois sistemas considerados (pasta de cimento e pasta de cimento com sílica

de fumo). As partículas micrométricas preenchem os espaços entre os grãos de cimento que são partículas muito maiores e portanto reduzem o volume de vazios. À medida que se vai dando a hidratação os poros capilares, resultantes na pasta com sílica de fumo são então muito mais finos que os poros na pasta só de cimento. Isto é, o facto de se incorporar sílica de fumo conduz a um refinamento da rede porosa. O refinamento da rede porosa tem implicações praticas importantes em betão com sílica de fumo tais como:

- menor permeabilidade e portanto
- maior durabilidade (Soroka, 1993).

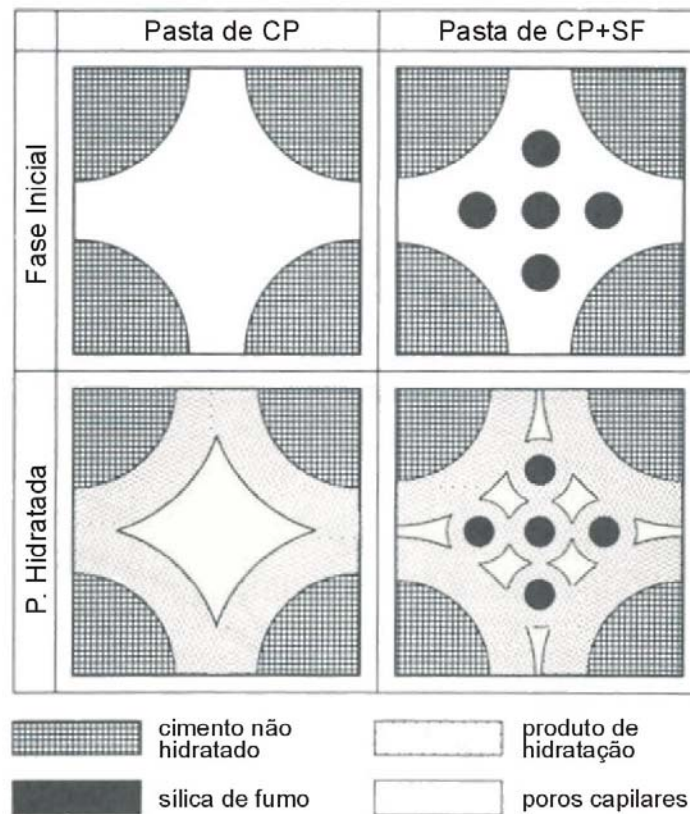


Figura 72 – Refinamento da rede porosa de pasta de cimento devido ao efeito de filler provocado pela sílica de fumo.

No betão fresco, regra geral, a introdução de sílica de fumo diminui a exsudação e a tendência para o betão segregar, embora faça aumentar a dosagem de água para manter a trabalhabilidade constante. No entanto, usando plastificantes ou superplastificantes, a quantidade de água de amassadura é pouco afectada pela introdução da sílica de fumo. A diminuição da exsudação pode aumentar o risco de o betão fissurar antes da presa, se não se mantiverem as superfícies húmidas, pois mais facilmente surgem situações em que a velocidade de evaporação da água é superior

àquela com que chega à superfície (Coutinho, 1988), portanto a cura é muito importante.

No betão endurecido podem conseguir-se aumentos na resistência à compressão com percentagens de substituição adequadas – Figura 73, não se observando redução das tensões de rotura nas primeiras idades, como sucedia com as cinzas volantes (Coutinho, 1988).

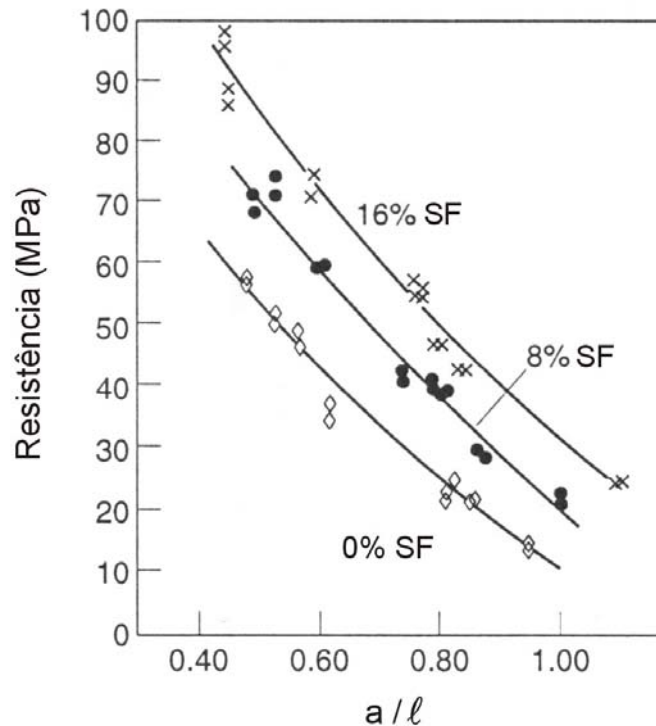


Figura 73 – Melhoria da resistência com adição de sílica de fumo ((Fidjestøl e Lewis, 1998).

A permeabilidade e a porosidade são diminuídas, o que aumenta a resistência do betão aos agentes agressivos. De facto, a sílica de fumo, devido à sua finura, vai ocupar os vazios entre as partículas do cimento e do agregado, diminuindo o diâmetro dos poros de maiores dimensões, tornando assim o conjunto mais denso como já referido. Estas circunstâncias tem conduzido à sua utilização no fabrico de betão de elevado desempenho, o que constitui uma das aplicações mais interessantes da sílica de fumo (Coutinho, 1988). Hoje já é pratica comum, por exemplo nos EU usar betão de elevado desempenho (com sílica de fumo) com resistência da ordem 100-130 MPa para por exemplo construção de edifícios altos. As torres Petronas em Kuala Lumpur foram construídas com betão de elevado desempenho que contém sílica de fumo (Fidjestøl e Lewis, 1998).

Em relação à retracção, o betão com sílica de fumo tem uma retracção idêntica à do betão comum mas com a secagem dá-se mais lentamente a taxa de evolução da retracção também é mais lenta e portanto verifica-se que a retracção observada é inferior neste tipo de betão – Figura 74 (Fidjestöl e Lewis, 1998).

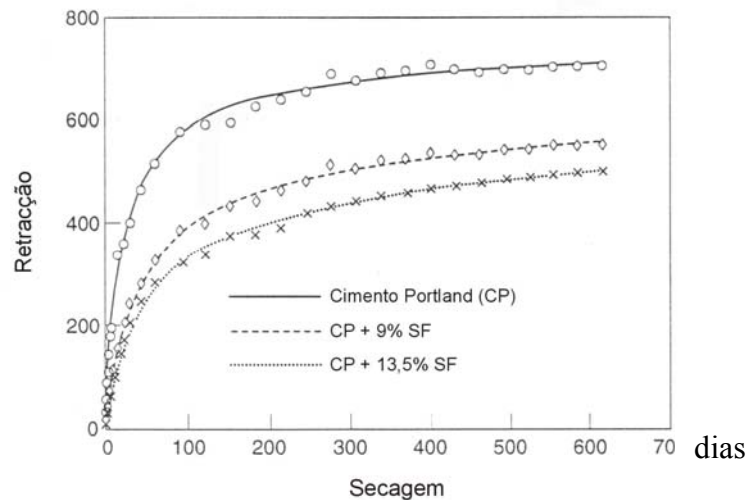


Figura 74 – Retracção em prismas curados 28 dias antes de serem ensaiados (Fidjestöl e Lewis, 1998).

3.9.7.3 Regulamentação

■ A NP EN 197-1 prevê a utilização da sílica de fumo como *constituente principal* do ligante definindo sílica do seguinte modo:

Sílica de fumo (D)

A sílica de fumo provem da redução de quartzo de alta pureza com carvão em fornos de arco eléctrico na produção de ligas de silício e de ferro-silício e é constituída por partículas esféricas muito finas contendo pelo menos 85 % em massa de dióxido de silício amorfo.

A sílica de fumo deve satisfazer os seguintes requisitos:

A perda ao fogo não deve exceder 4,0 % em massa, determinada de acordo com a NP EN 196-2, mas usando um tempo de calcinação de 1 h.

A superfície específica (BET) da sílica de fumo não tratada deve ser de pelo menos 15000 m²/kg, quando ensaiada segundo a ISO 9277.

Para moer conjuntamente com clínquer e sulfato de cálcio, a sílica de fumo pode estar no seu estado original ou compactada ou granulada (com água) (NP EN 197-1)

Esta norma prevê a incorporação de sílica de fumo no seguinte cimento:

- Cimento Portland de sílica de fumo: CEM II/A-D com 6 a 10%.

E eventualmente no:

- Cimento Portland composto em conjunto com outros constituintes (CEM II/A-M e CEM II/B-M)
- Cimentos pozolânicos em conjunto com outros constituintes (CEM IV A e CEM IV/B)
- Cimento composto em conjunto com outros constituintes (CEM V/A e CEM 5/B).

■ Para a sílica de fumo como *adição* (na altura da amassadura do betão) considera-se a especificação **LNEC E 464 (2005). Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais** que refere as condições em que a sílica de fumo pode ser utilizadas e estabelece a aptidão duma dada mistura, incluindo por ex. a sílica de fumo para ser constituinte do betão. A sílica de fumo tem de estar de acordo com as normas europeias já publicadas entre nós (ver Quadro 15):

NP EN 13263-1:2006. Sílica de fumo para betão. Parte 1: Definições, requisitos e critérios de conformidade.

NP EN 13263-2:2006. Sílica de fumo para betão. Parte 2: Avaliação da conformidade.

3.9.8 Cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz (RHA) é obtida por queima controlada de casca de arroz. A casca de arroz corresponde a cerca de um quinto do arroz produzido mundialmente (cerca de 300 milhões de toneladas por ano). A cinza obtida é uma pozolana muito reactiva constituída por sílica amorfa e que produz no betão os efeitos semelhantes aos da sílica de fumo. As partículas da cinza de casca de arroz são diferentes das de sílica de fumo pois apresentam uma estrutura celular – Figuras 75 e 76, que é responsável pela elevada superfície específica desta pozolana cujas partículas não são de tamanho muito reduzido (Sampaio, Sousa Coutinho e Sampaio, 2001; Sousa, 2005).

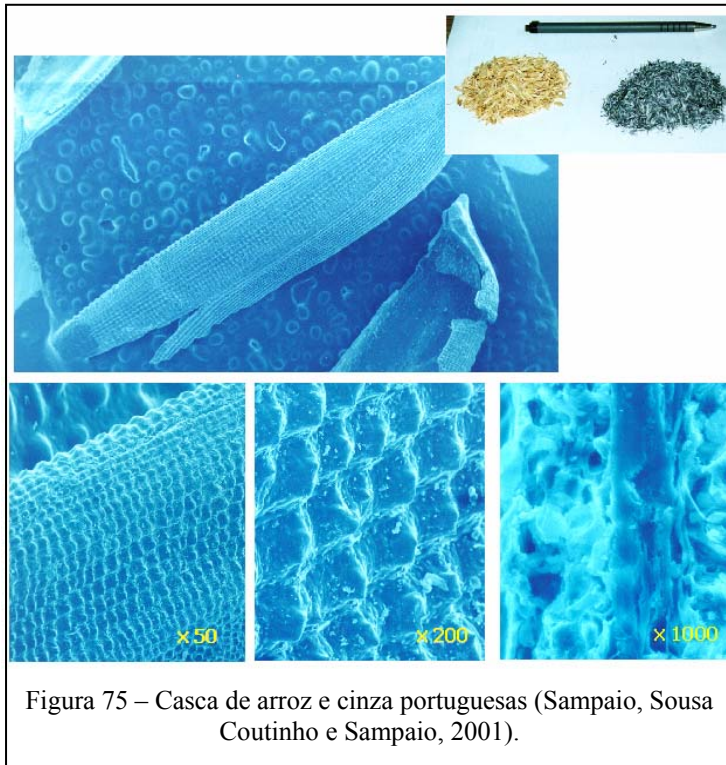


Figura 75 – Casca de arroz e cinza portuguesa (Sampaio, Sousa Coutinho e Sampaio, 2001).

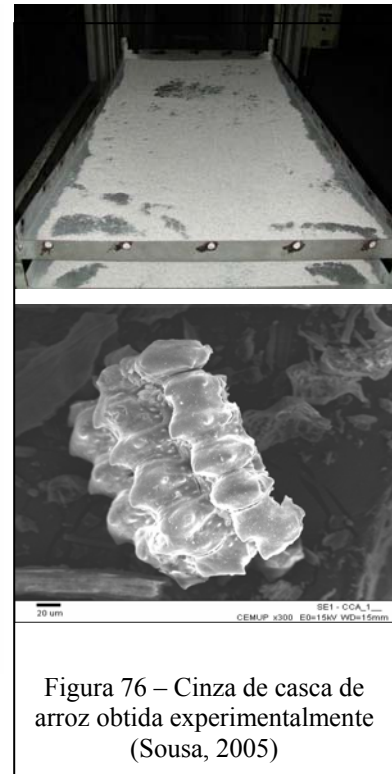


Figura 76 – Cinza de casca de arroz obtida experimentalmente (Sousa, 2005)

3.9.9 Determinação da reactividade de uma adição tipo II

Para as adições tipo II é comum determinar a sua reactividade através do método designado por ÍNDICE DE ACTIVIDADE embora se use, para os cimentos pozolânicos (CEM IV), também um outro método, o da POZOLANICIDADE.

- O ÍNDICE DE ACTIVIDADE é um método que se baseia na determinação da tensão de rotura de pastas ou argamassas

- A POZOLANICIDADE consiste num método baseado na determinação do grau de combinação do Ca(OH)_2 com a pozolana.

3.9.9.1 Índice de Actividade (adições tipo II)

O índice de actividade de uma adição corresponde à razão (em percentagem) entre a resistência à compressão de provetes normalizados de argamassa preparados com determinada percentagem (em massa) da adição em estudo e a restante de cimento de referência e a resistência à compressão de provetes normalizados de argamassa preparados apenas com cimento de referência, ambos ensaiados com a mesma idade e condições.

No Quadro 15 apresentam-se os requisitos em termos de índice de actividade para as adições regulamentadas. Apresenta-se na 4ª coluna a percentagem de substituição do cimento CEMI pela adição que se utiliza para produzir provetes normalizadas de argamassa segundo a NP EN 196-1. Note-se que todos os documentos, excepto a especificação do LNEC E 375:1993 (ainda em vigor mas a ser substituída pelas EN 15167-1 e EN 15167-2 logo que estas sejam publicadas), exigem que se determine para as adições, o Índice de Actividade (IA) aos 7 e/ou 28 dias de acordo com a NP EN 196-1 (ver **) e que sejam respeitados os valores referidos na última coluna do Quadro 15.

Quadro 15 – Índices de actividade exigidos para as diversas adições.

Adição/const. principal do cimento	composição	Documento normativo	Substituição de CEMI* pela adição	Índice de Actividade IA
Escórias <i>adição</i>	Pelo menos 2/3 de CaO, MgO e SiO ₂ com (CaO+MgO/SiO ₂) > 1	E 375:1993	30%	É determinada a resistência aos 7 e 28 dias R _{7d} ≥ 12 MPa R _{28d} ≥ 24 MPa
	restante Al ₂ O ₃ + ...	prEN 15167-1	50%	IA _{7d} ≥ 45% IA _{28d} ≥ 70%
Pozolana natural <i>adição</i>	Sobretudo SiO ₂ (>25%) e Al ₂ O ₃ mas tb. Fe ₂ O ₃ + ...	NP 4220:1993	25%	IA _{28d} ≥ 85% **
Xisto cozido no cimento		NP EN 197-1	0	R _{28d} ≥ 25 MPa
Cinza volante Calcária W no cimento (prop. pozolânicas)	CaO (reactivo) > 10% SiO ₂ Al ₂ O ₃ mas tb. Fe ₂ O ₃ + Se 10 < CaO < 15% então SiO ₂ > 25%	NP EN 197-1		Se CaO(reactivo) > 15% → É determinada a resistência aos 28 dias R _{28d} ≥ 10 MPa
Cinza volante Siliciosa V no cimento (prop. pozolânicas e hidráulicas)	SiO ₂ > 25% Al ₂ O ₃ CaO (reactivo) ≤ 10%	NP EN 197-1		
Cinza volante siliciosa <i>adição</i>	SiO ₂ > 25% Al ₂ O ₃ CaO(reactivo) ≤ 10%	NP EN 450-1:2006	25%	IA _{7d} ≥ 75% IA _{28d} ≥ 85%
Sílica de fumo no cimento	SiO ₂ > 85% (BET > 15 m ² /g)	NP EN 197-1		
Sílica de fumo <i>adição</i>	SiO ₂ > 85% (15 < BET < 35 m ² /g)	NP EN 13263-1:2006	10%	IA _{28d} ≥ 100%

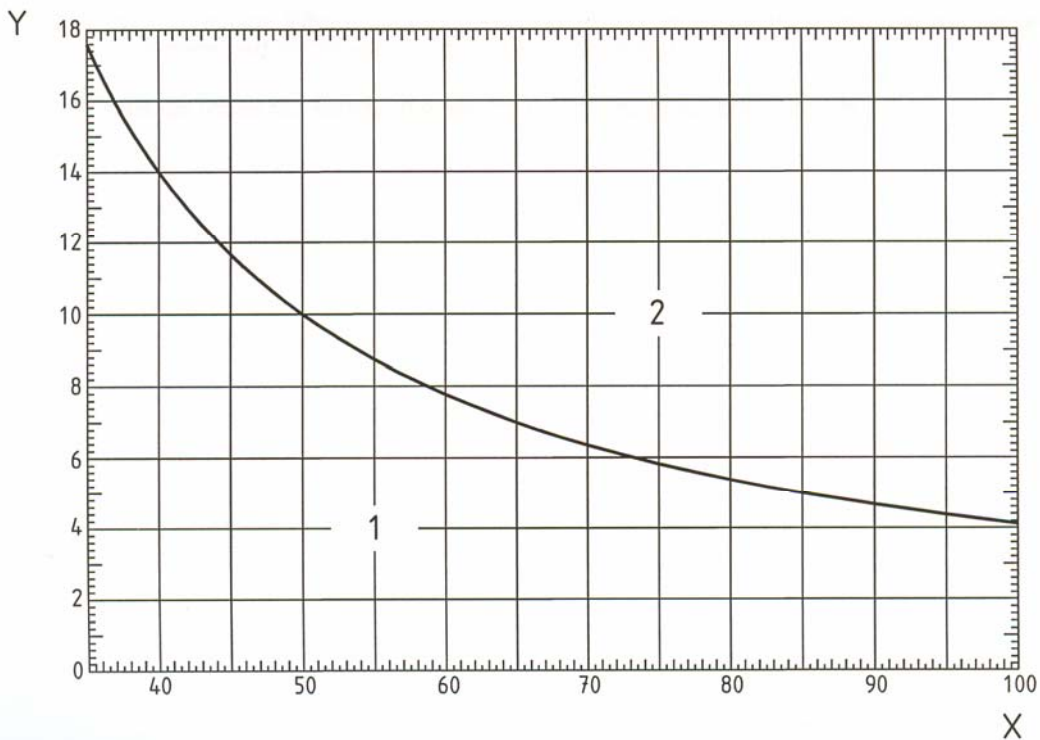
* Em cada documento normativo são referidas as características do CEMI

** Procedimento acordo com a NP EN 196-1, salvo no referente à conservação do provete decorridas 24 h após a amassadura e até 24 horas antes do ensaio, que deve ser feita em água a 38 ± 2°C

3.9.9.2 Pozolanicidade

Segundo a **NP EN 196-5 Métodos de ensaio de cimentos. Parte 5: Ensaio de pozolanicidade dos cimentos pozolânicos (CEM IV)** usam-se 20 g do cimento pozolânico para 100 ml de água. No final mede-se a quantidade de Ca(OH)_2 presente na solução e compara-se com a quantidade que satura um meio com a mesma alcalinidade. Mistura-se vigorosamente com a água e coloca-se de 8 a 15 dias a 40°C .

O ensaio considera-se positivo (satisfaz o ensaio) se a concentração de Ca(OH)_2 na solução for inferior a concentração de saturação, isto é, se o ponto correspondente estiver abaixo da curva de concentração representada na Figura 77. A Norma não é aplicável aos cimentos portland de pozolana nem às pozolanas.



Legenda

1 Satisfaz

2 Não satisfaz

X Concentração em ião hidroxilo, mmol/L

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

Figura 77 – Diagrama para a determinação da pozolanicidade (NP EN 196-5).

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

3.10 ESPECIFICAÇÕES DOS CIMENTOS E NORMALIZAÇÃO EM PORTUGAL

Neste momento em Portugal o cimento cinzento produzido pelas cimenteiras nacionais vêm apostado da marca de qualidade CC e é fabricado de acordo com as normas que abrangem toda a União Europeia (EN 197).

As características fixadas nestas normas são de natureza mecânica, física, química e de durabilidade:

Características mecânicas:	Resistência de referência Resistência aos primeiros dias
Características físicas:	Tempo de início de presa Expansibilidade
Características químicas:	Perda ao fogo Resíduo insolúvel Teor de sulfatos Teor de cloretos Pozolanicidade

Note-se que os requisitos relativamente a estas características estão fixadas nas normalização referida em 3.1. Os métodos de ensaio vem referidos na norma NP EN 196 :



NP EN 196. Métodos de ensaios de cimentos

NP EN 196 – 1 (2006) Determinação das resistências mecânicas.

NP EN 196 – 2 (2006) Análise química dos cimentos.(incorpora a EN 196-21)

NP EN 196 – 3 (2006) Determinação do tempo de presa e expansibilidade,

Foi elaborado um documento ENV 196-4:Métodos de ensaio de cimentos – Parte 4: Determinação quantitativa dos constituintes, que será publicado como Relatório Técnico CEN.

NP EN 196 – 5 (2006) Ensaio de pozolanicidade dos cimentos pozolânicos.

NP EN 196 – 6 (1996) Determinação da finura.

NP EN 196 – 7 (1996) Métodos de colheita e preparação de amostras de cimento.

NP EN 196 – 8 (2006). Métodos de ensaio de cimentos – Parte 8: Calor de hidratação – Método da dissolução

NP EN 196 – 9 (2006). Métodos de ensaio de cimentos – Parte 8: Calor de hidratação – Método semi-adiabático

Os cimentos brancos para os quais não existe norma europeia específica, são fabricados em Portugal segundo a norma NP 4326 (1996) e de acordo com a NP 4435 (2004).

Os 27 produtos da família dos cimentos correntes, abrangidos pela NP EN 197-1, a sua designação e composição são indicados no Quadro 16 (Quadro 1, NP EN 197-1). Eles são agrupados em cinco principais tipos de cimento:

- - CEM I Cimento Portland
- - CEM II Cimento Portland composto
- - CEM III Cimento de alto forno
- - CEM IV Cimento pozolânico
- - CEM V Cimento composto

Apresentam-se seguidamente algumas definições pertinentes para a compreensão do referido quadro, transcritas da NP EN 197-1 (*em itálico*):

Constituinte principal - material inorgânico especialmente seleccionado e utilizado numa percentagem superior a 5% em massa em relação à soma de todos os constituintes principais e adicionais minoritários.

Os constituintes principais podem ser:

Clinker do cimento Portland (K)

Escória granulada de alto forno (S)

Pozolana natural (P)

Pozolana natural calcinada (Q)

Cinza volante siliciosa (V)

Cinza volante calcária (W)

Xisto cozido (T)

Calcário (L, LL)

Sílica de fumo (D)

Constituinte adicional minoritário - material inorgânico especialmente seleccionado e utilizado numa percentagem não excedendo um total de 5% em massa em relação à soma de todos os constituintes principais e adicionais minoritários.

Quadro 16 - Os 27 produtos da família de cimentos correntes (NP EN 197-1, 2001)

Notação dos 27 produtos (tipos de cimento corrente)		Composição (percentagem em massa ^a)										Constituintes adicionais minoritários	
		Constituintes principais											
		Clinker K	Escória de alto forno S	Silica de fumo D ^b	Pozolana		Cinza volante		Xisto cozido T	Calcário			
natural P	natural calcificada Q				silícios a V	calcária W	L	LL					
Cimento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de escória	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de sílica de fumo	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de pozolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de cinza volante	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de xisto cozido	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
Cimento Portland de calcário	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
Cimento Portland composto ^c	CEM II/A-M	80-94	<----- 6-20 ----->									0-5	
	CEM II/B-M	65-79	<----- 21-35 ----->									0-5	
Cimento de alto forno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento pozolânico ^c	CEM IV/A	65-89	-	<----- 11-35 ----->					-	-	-	0-5	
	CEM IV/B	45-64	-	<----- 36-55 ----->					-	-	-	0-5	
Cimento composto ^c	CEM V/A	40-64	18-30	-	<----- 18-30 ----->			-	-	-	-	0-5	
	CEM V/B	20-38	31-50	-	<----- 31-50 ----->			-	-	-	-	0-5	

valores do quadro referem a soma dos constituintes principais e dos adicionais minoritários..

^a Incorporação de sílica de fumo é limitada a 10 %.

^c Os cimentos Portland compostos CEM II/A-M e CEM II/B-M, nos cimentos pozolânicos CEM IV/A e CEM IV/B e nos cimentos compostos CEM V/A e CEM V/B os constituintes principais, além do clínquer, devem ser declarados na designação do cimento (por exemplo ver cláusula 8)

Clinker do cimento Portland (K)

Como visto anteriormente, o *clinker do cimento Portland* resulta da sinterização de uma mistura rigorosamente especificada de matérias primas (farinha ou pasta) contendo elementos, geralmente expressos como óxidos, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e pequenas quantidades de outros materiais. A farinha ou a pasta finamente pulverizada, intimamente misturada e por isso homogénea (NP EN 197-1).

Repare-se que as diferenças fundamentais relativamente aos constituintes principais entre os cinco tipos de cimento são:

CEM I: cimento apenas constituído por um único constituinte principal – o clinker.

CEM II ou cimentos Portland: constituídos por pelo menos cerca de dois terços ($\geq 65\%$) de clinker.

CEM III ou cimentos de alto forno: constituído por clinker e por mais de 35% de escórias de alto forno, podendo esta quantidade chegar a 95%.

CEM IV ou cimentos pozolânicos: constituídos por mais de 45% de clinker e o restante por sílica de fumo, pozolana ou cinzas volantes.

CEM V ou cimentos compostos: constituídos por pelo menos 20% de clinker e pelo menos 18% de escórias sendo o restante pozolana e/ou cinza volante siliciosa.

Portanto um cimento CEM só é designado por “Portland” se contém pelo menos 65% de clinker (Jackson, 1998).

Constituintes adicionais minoritários

Os constituintes adicionais minoritários são materiais minerais inorgânicos naturais e materiais minerais inorgânicos derivados do processo de produção de clinker, especialmente seleccionados, ou constituintes como especificado em 5.2, salvo se estiverem incluídos como constituintes principais do cimento.

Os constituintes adicionais minoritários, depois de preparação adequada e tendo em conta a sua distribuição granulométrica, melhoram as propriedades físicas do cimento (tais como a trabalhabilidade ou a retenção de água). Podem ser inertes ou ter propriedades levemente hidráulicas, hidráulicas latentes ou pozolânicas. Contudo, não são fixados requisitos para eles a este respeito.

Os constituintes adicionais minoritários devem ser correctamente preparados, isto é, seleccionados, homogeneizados, secos e pulverizados, dependendo do seu estado de produção ou de entrega. Não devem aumentar consideravelmente a necessidade de água do cimento, enfraquecer a resistência do betão ou da argamassa à deterioração, em qualquer caso, ou reduzir a protecção à corrosão da armadura do betão.

Sulfato de cálcio

O sulfato de cálcio é adicionado aos outros constituintes do cimento durante o seu fabrico para controlar a presa.

O sulfato de cálcio pode ser gesso (sulfato de cálcio dihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), ou anidrite (sulfato de cálcio anidro, CaSO_4) ou qualquer mistura dos mesmos. O gesso e a anidrite encontram-se em estado natural. O sulfato de cálcio está também disponível como um sub-produto de determinados processos industriais.

Aditivos

Os aditivos considerados na EN 197-1 são constituintes não abrangidos nos parágrafos 5.2 a 5.4 que são adicionados para melhorar o fabrico ou as propriedades do cimento.

A quantidade total de aditivos não deve exceder 1.0 % em massa do cimento (excepto para pigmentos). A quantidade de aditivos orgânicos, numa base seca, não deve exceder 0.5 % em massa do cimento.

Estes aditivos não devem desenvolver a corrosão da armadura do betão ou prejudicar as propriedades do cimento ou do betão ou da argamassa de cimento.

Quando são usados no cimento adjuvantes para betão, argamassa ou caldas de injeção, conformes com a EN 934, a notação normalizada do adjuvante deve ser declarada nos sacos ou nas guias de remessa (NP EN 197-1).

Os requisitos mecânicos e químicos dos cimentos terão que estar de acordo com os Quadros 17 e 18 (2 e 3 da NP EN 197-1, respectivamente).

Quadro 17 - Requisitos mecânicos e físicos considerados como valores característicos especificados (Quadro 2, NP EN197-1).

Classe de resistência	Resistência à compressão MPa			Tempo de início de presa min	Expansibilidade (Expansão) mm
	Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência 28 dias		
	2 dias	7 dias			
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	-			
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	
42,5 R	≥ 20,0	-			
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	
52,5 R	≥ 30,0	-			

Quadro 18 - Requisitos químicos considerados como valores característicos especificados (Quadro 3, NP EN197-1).

1	2	3	4	5
Propriedade	Referência de ensaio	Tipo de cimento	Classe de resistência	Requisitos ^a
Perda ao fogo	EN 196-2*	CEM I CEM III	Todas	≤ 5,0 %
Resíduo insolúvel	EN 196-2 ^b	CEM I CEM III	Todas	≤ 5,0 %
Teor de sulfato (em SO ₃)	EN 196-2	CEM I CEM II ^c CEM IV CEM V	32,5 N 32,5 R 42,5 N	≤ 3,5 %
			42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤ 4,0 %
		CEM III ^d	Todas	
Teor de cloreto	EN 196-21	Todas ^e	Todas	≤ 0,10 % ^f
Pozolanicidade	EN 196-5	CEM IV	Todas	Satisfaz o ensaio

^a Os requisitos são indicados como percentagem em massa do cimento finalizado.
^b A determinação do resíduo insolúvel em ácido clorídrico e carbonato de sódio.
^c O tipo de cimento CEM II/B-T pode conter até 4,5 % de sulfato em todas as classes de resistência.
^d O tipo de cimento CEM III/C pode conter até 4,5 % de sulfato.
^e O tipo de cimento CEM III pode conter mais do que 0,10 % de cloreto, mas neste caso o máximo teor de cloreto deve ser referido na embalagem e/ou na guia de remessa.
^f Para aplicações em betão pré-esforçado, os cimentos podem ser produzidos com um valor inferior. Se assim fôr, o valor de 0,10% deve ser substituído por este valor inferior, o qual deve ser indicado na guia de remessa.

3.11 CIMENTOS ESPECIAIS

3.11.1 Cimento Supersulfatado (Ciment mettalurgique supersulfaté)

Este cimento especial é constituído por:

80 – 85% escórias granuladas de alto forno

10 – 15% sulfato de cálcio

5% clínquer de cimento Portland

Apresenta em geral uma finura de 400 – 500 m²/kg e deve ser armazenado em locais sem humidade para não se deteriorar rapidamente.

Não está normalizado na Europa mas no Reino Unido a norma é a BS 4248:1974 embora já não se produza nesse país. É muito usado na Bélgica.

Apresenta as seguintes características:

- elevada resistência à água do mar
- elevada resistência em ambientes com concentrações altas de sulfatos, tais como em solos ou águas subterrâneas
- resistente a ácidos carboníferos e óleos
- usado em esgotos e solos contaminados
- baixo calor de hidratação pelo que é adequado para betão em massa

No entanto pode ser:

- desaconselhável em ambientes frios onde o desenvolvimento da resistência é lento
- desaconselhável sem ensaios prévios, se usado com cura acelerada com vapor, acima 50°C
- desaconselhável a mistura com cimentos Portland pois o hidróxido de cálcio em excesso resultante da hidratação do cimento Portland, interfere com a reacção da escória com o sulfato de cálcio.
- necessária cura húmida de pelo menos 4 dias sobretudo em ambientes quentes

- necessária mais água que em cimentos Portland recomendando-se $A/C \geq 0.4$
- também é recomendado não utilizar menos cimento do que o correspondente a um traço 1 : 6

Em princípio é menos resistente que o cimento (Portland) resistente aos sulfatos quando a concentração de sulfatos excede 1% (Neville, 1995).

3.11.2 Cimento aluminoso

O cimento aluminoso é muito diferente do cimento Portland quer em composição quer nalgumas propriedades, pelo que a sua aplicação em betão estrutural é muito limitada, tendo sido proibido o seu uso no Reino Unido e EUA. As técnicas de betonagem são semelhantes às do cimento Portland.

O cimento aluminoso oferece elevada resistência ao ataque por sulfatos devido à ausência de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no cimento hidratado e também devido à influência protectora de gel de alumina que se forma durante o processo de hidratação e que é relativamente inerte.

A composição é aproximadamente a seguinte:

cerca de 40% alumina

40% óxido de cálcio

15% óxido de ferro

5% sílica

pequenas quantidades de TiO_2 , óxido de magnésio e álcalis podem estar presentes

A matéria prima é geralmente calcário e bauxite.

A bauxite é uma rocha sedimentar residual formada por degradação em ambientes tropicais de rochas pré-existentes ricas em alumínio.

A bauxite é composta de alumina hidratada, óxidos de ferro e titânio e pequenas quantidades de sílica.

O calcário e bauxite são aquecidos fundindo totalmente a 1600°C em fornos especiais e depois arrefecido e moído produzindo-se um pó muito escuro com finura de 290 – 350 m²/kg.

O custo do cimento aluminoso é muito elevado devido ao elevado consumo de energia de produção e desgaste verificado na moagem.

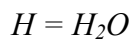
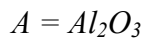
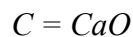
É necessário salientar que a resistência química diminui drasticamente após o fenómeno designado por **conversão** do cimento aluminoso.

O cimento aluminoso hidratado é constituído por aluminatos cálcicos hidratados (CAH_{10}) e pequenas quantidades de C_2AH_8 e gel aluminoso ($Al_2O_3.aq$) e como referido, isento de $Ca(OH)_2$.

Mas o componente principal CAH_{10} é quimicamente instável quer a temperaturas mais elevadas quer a normais transformando-se em C_3AH_6 e gel aluminoso, fenómeno designado por **conversão**:



Nota:



O problema do fenómeno da conversão do cimento aluminoso reside no facto de levar à perda da resistência do betão e aumento de porosidade da pasta.

Em Inglaterra o cimento aluminoso foi utilizado em estruturas pré-esforçadas por este tipo de cimento apresentar resistências muito elevadas nas primeiras idades. Depois de uma série de acidentes devido ao fenómeno da conversão, foi proibido, no início dos anos 70, o uso deste tipo de cimento.

O betão com cimento aluminoso tem importantes propriedades refractárias a partir dos 1000°C. Com utilização de agregado de tijolo refractário tem um bom comportamento até cerca de 1350°C e com agregados especiais fabricados de alumina fundida ou "carborundum" até uma temperatura de 1600°C ou ainda superiores (1800°C) utilizando-se um cimento branco especial de aluminato de cálcio com agregado de alumina fundida.

O betão refractário produzido com cimento aluminoso tem também uma elevada resistência ao ataque por ácidos.

Pode-se produzir betão leve para isolamento térmico em situações em que as temperaturas podem atingir cerca de 95°C, utilizando-se cimento aluminoso e agregado leve e obtendo-se betão com densidade de 500 – 1000 kg/m³ e condutibilidade térmica de 0.21 a 0.29 J/m²S°C (Neville, 1995).

3.11.3 Cimento Expansivo

O cimento expansivo é um cimento que apresenta a propriedade de expandir às primeiras idades e assim compensar a retracção causada por secagem.

Este cimento é bastante mais dispendioso que cimento Portland mas pode ter muito interesse para obras onde é importante a redução ou eliminação de possível fissuração. De facto o que se verifica é que a expansão inicial equilibra aproximadamente a retracção usual subsequente.

Os primeiros cimentos expansivos foram desenvolvidos em França e Rússia usando-se uma mistura de cimento Portland, agente expansivo e um estabilizador. O agente expansivo era obtido pela calcinação de uma mistura de gesso, bauxite e cré (rocha calcária) com formação de sulfato de cálcio e aluminato de cálcio (sobretudo C₃A). Em presença de água estes compostos conduzem á formação de etringite (sulfoaluminato de cálcio hidratado) acompanhada de expansão da pasta de cimento. O estabilizador era escória de alto forno que consumia lentamente o excesso de sulfato de cálcio evitando a continuação da expansão.

Hoje fabricam-se 3 tipos de cimentos expansivos embora apenas um deles seja comercializado nos EUA. A norma americana ASTM C 845-90 classifica os cimentos expansivos (designados, todos, por Tipo E-1) de acordo com o agente expansivo usado com cimento Portland e sulfato de cálcio. Em qualquer dos 3 cimentos o agente expansivo é uma fonte de aluminato reactivo que se combina com os sulfatos formando-se etringite. Esta reacção é rápida.

Embora a formação de etringite seja muito nefasta em betão endurecido, a formação controlada de etringite nos primeiros dias após a betonagem é utilizada como efeito compensador da retracção (Neville, 1995).

4. CALDAS DE INJECCÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Uma calda de injeccão é uma mistura de cimento, possivelmente adjuvantes e grande quantidade de água, em geral com uma razão água/cimento (massa) de 0,36 a 0,40 (no máximo até 0.44).

As caldas de injeccão são utilizadas para:

- injeccão de bainhas (cabos de pré-esforço)
- ancoragens
- colmatação de fendas em maciços rochosos, etc.

De facto os aços de pré-esforço, quando em tensão, são particularmente sensíveis à corrosão. Só uma capaz e segura protecção capaz e segura garantirá a duração e conservação a longo prazo das armaduras e, conseqüentemente, das estruturas.

A protecção mais comum e eficaz é conseguida com injeccão das bainhas de calda de cimento.

Existem também, protecções flexíveis com massas e óleos associados a bainhas de polietileno.

No pré-esforço por aderência é o próprio betão estrutural que garante a protecção ao envolver o aço (Nero, 1998)

Nas Figura 78 apresentam-se um esquema e a fotografia correspondente a um cabo de pré-esforço.

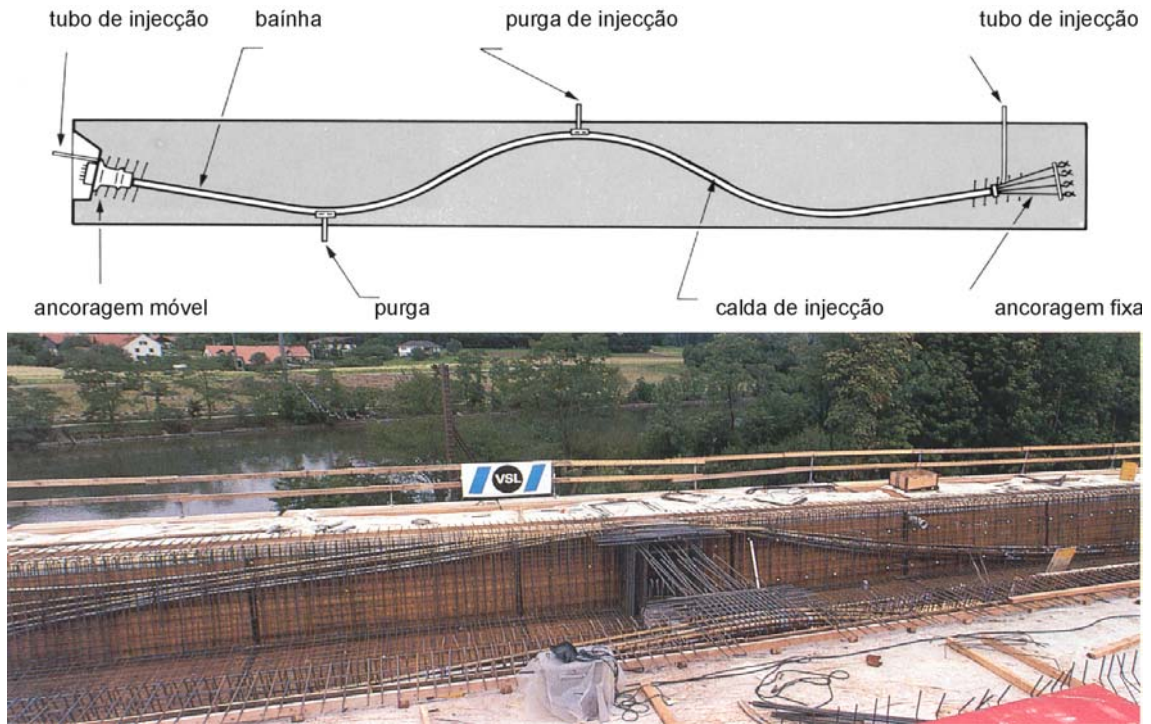


Figura 78 – Esquema e fotografia de um cabo de pré-esforço, pronto para injeção (Dywidag).

Nas Figuras 79 a 85 apresentam-se fotografias de vários aspectos relacionados com a aplicação de caldas em bainhas de pré-esforço.



Figura 79 – Cabeça de ancoragem e bainhas (Dywidag).



Figura 80 – Cabos de pré-esforço em rolo (Dywidag).



Figura 81 – Bainha para cabo de pré-esforço (Dywidag).

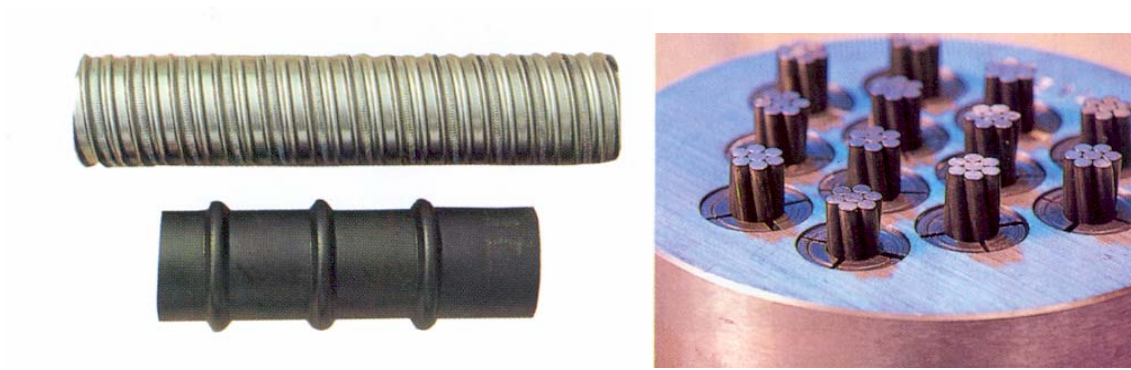


Figura 82 – Dois tipos diferentes de bainhas e uma cabeça de ancoragem (Dywidag).



Figura 83 – Cabeça de ancoragem e bainha.

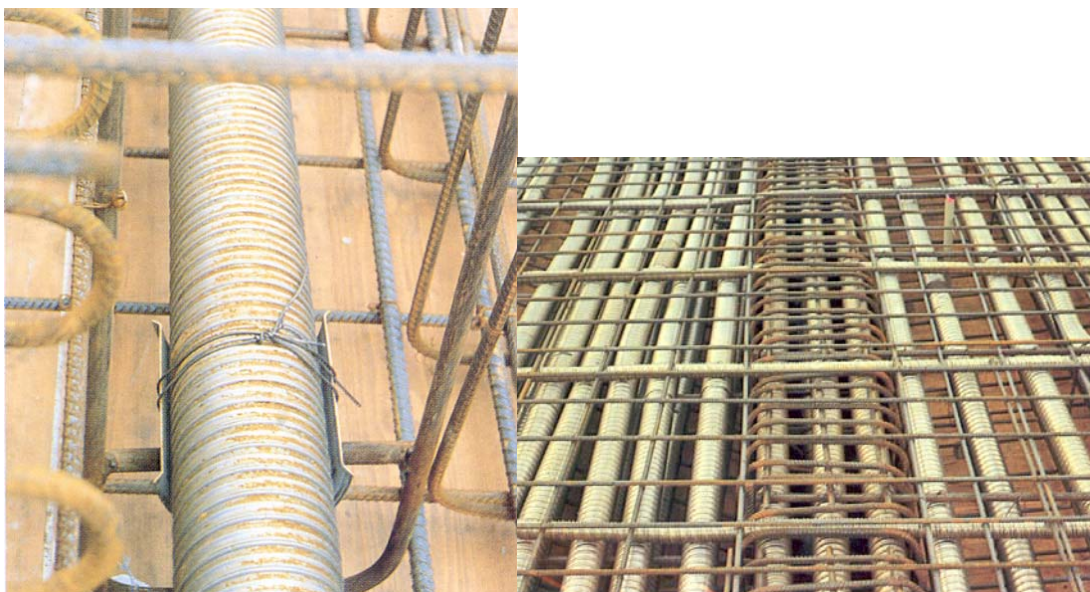
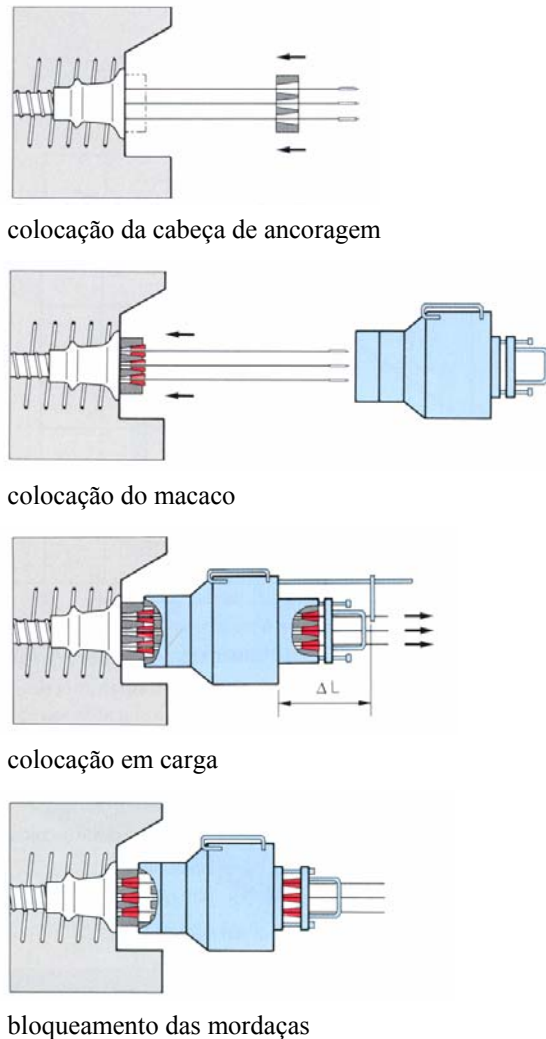


Figura 84 – Aspectos das bainhas no local (VSL).



colocação da cabeça de ancoragem



colocação do macaco



colocação em carga, medição de alongamentos, bloqueamento dos cordões

Figura 85 - Aplicação do pré-esforço (VSL).

4.2 FABRICO

A calda deverá ser fabricada em equipamento especial normalmente dispendo-se de duas cubas. Numa das cubas é fabricada a calda em mistura a alta velocidade passando em seguida à segunda cuba onde a calda é apenas agitada e daí sendo injectada por uma bomba capaz de manter uma pressão de 1 MPa pelo menos Figura 86.

Habitualmente a ordem de entrada dos componentes na primeira cuba é: água, cimento e adjuvante.



Figura 86 –Equipamento para fabrico (à esquerda) e injeção (à direita) de calda.

4.3 PROPRIEDADES DA CALDA E NORMALIZAÇÃO

As propriedades da calda de cimento dependem de muitos factores salientando-se os seguintes:

- tipo e idade do cimento
- razão água:cimento
- tipo e quantidade de adjuvante
- temperatura e
- técnica de mistura e bombagem.

As reacções químicas que têm lugar durante o processo de hidratação do cimento tornam difícil a previsão, com segurança, das propriedades da calda (Nero, 1998).

As caldas de injeção para armaduras de pré-esforço tem de estar de acordo com as normas seguintes:

NP EN 445 Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio (2000)

NP EN 446 Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Procedimentos de injeção (2000)

NP EN 447 Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Especificações para caldas correntes (2000)

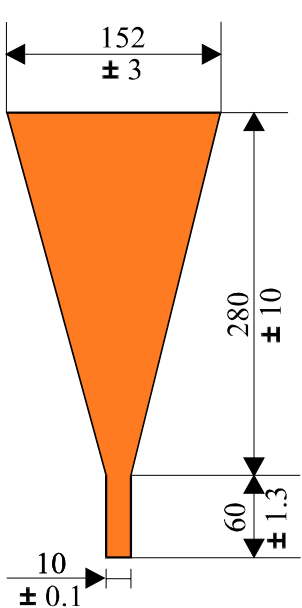
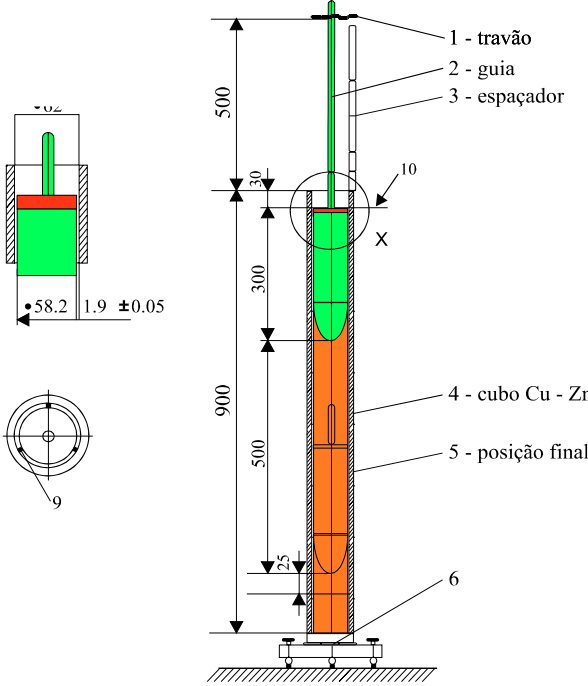
Segundo estas normas as caldas de injeção devem satisfazer requisitos relativos a:

1. Fluidez
2. Exsudação
3. Variação de volume e
4. Resistência

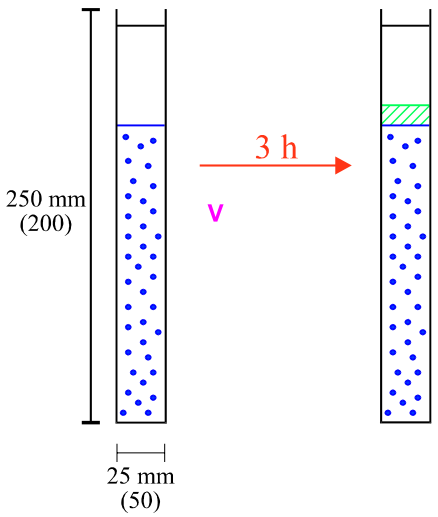
As condições gerais para realização dos ensaios devem ser tais que a temperatura seja de $20^0 \pm 2^0$ C e a Humidade Relativa superior a 65%. O cimento a utilizar deve em princípio ser tipo CEM I em acordo com a NP EN 197-1.

Descrevem-se sucinta e esquematicamente alguns dos métodos de ensaio relativos a caldas de injeção referidos nas normas acima mencionadas:

1. Ensaio de fluidez: Durante o período de injeção a fluidez deve ser suficientemente elevada de modo a permitir uma injeção eficaz e adequada por forma a encher a bainha, mas suficientemente baixa para expulsar todo o ar eventual água da bainha (NP EN 447, 2000).

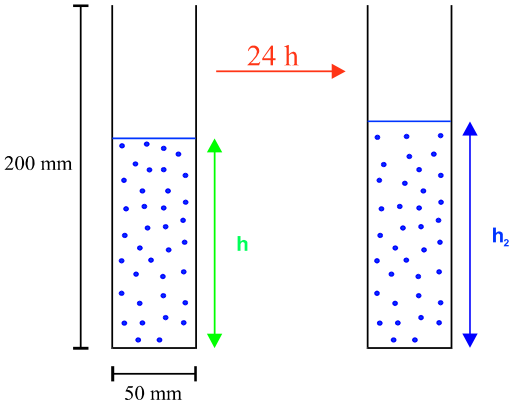
MÉTODO DO CONE	MÉTODO DE IMERSÃO
<p>Determinação do tempo de escoamento (segundos) de 1 litro de calda. É colocado no cone cerca de 1,7 litros de calda tendo-se previamente ajustada, na entrada do cone, um peneiro amovível de malha 1,5mm para evitar eventuais grumos. Coloca-se sob o orifício do cone um recipiente de capacidade 1 litro.</p>	<p>Determinação do tempo de percurso (segundos) de uma sonda através de uma determinada quantidade de calda colocada num tubo vertical. O tubo é cheio com aproximadamente 1,9 litros de calda, é colocada a sonda de modo que fique imersa na calda na parte superior do tubo de tal modo que o espaçador de madeira(3) assente no bordo do tubo, sustente o travão(1) da extremidade superior do guia(2). O tempo de percurso é contado a partir do momento em que se retira o espaçador e a sonda começa a descer.</p>
	
<ul style="list-style-type: none"> Tempo de escoamento medida logo a seguir ao fabrico ≤ 25 s Dois valores medida 30m após(mantendo entretanto a agitação) ≤ 25 s 	<ul style="list-style-type: none"> Ensaio realizado imediatamente a seguir ao fabrico da calda ≥ 30 s 30 minutos depois (mantendo agitação) ≤ 80 s 3 medidas de cada vez, considerando só as duas últimas. O resultado igual á média das duas últimas medidas.
<ul style="list-style-type: none"> À saída da bainha ≥ 10 s 	<ul style="list-style-type: none"> À saída da bainha ≥ 25 s

2. Ensaio de exsudação: A exsudação das caldas de injeção deve ser suficientemente baixa para evitar a segregação e a sedimentação.

<p>O ensaio da exsudação consiste na medição da quantidade de água que reflui á superfície ao fim de 3 horas, sendo impedida a evaporação (NP EN 447, 2000).</p>	
	<p>Dimensões da proveta cilíndrica graduada transparente:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Diâmetro 25 mm e altura 250mm (graduada em ml) ou ➤ Diâmetro 50 mm e altura 200mm (graduada em mm)
<p>Para a proveta de 25mm de diâmetro, verter 95 a 100ml de calda na proveta e medir o nível V. Tomando medidas que impeçam a evaporação medir, três horas mais tarde , a quantidade de água á superfície da calda (V_1).</p> <p>Para a proveta de 50mm de diâmetro verter a calda na proveta aproximadamente até a altura de 150mm proceder como explicado anteriormente.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ ± 100 ml se Ø25 ➤ até ± 150 mm se Ø50 	<p>CALDA DE INJEÇÃO CORRENTE (NP EN 447)</p> $\frac{V_1}{V} < 2\%$

3. Ensaio de variação de volume: A variação de volume tanto pode ser um aumento como uma diminuição. Para caldas de injeção que contenham agentes expansivos não se deverá registar diminuição de volume (NP EN 447, 2000).

<p>O ensaio da variação de volume consiste na determinação da variação de volume ao fim de 24 horas e permite determinar principalmente a variação de volume causada por sedimentação ou expansão.</p> <p>Existem dois métodos designados por método da proveta cilíndrica e método do recipiente.</p>
<p>Método da proveta cilíndrica: Neste método aproveita-se a proveta cilíndrica de 50mm de diâmetro e 200mm de altura usada no ensaio da exsudação.</p>

<p>Método da proveta cilíndrica:</p>  <p>200 mm</p> <p>50 mm</p> <p>h</p> <p>24 h</p> <p>h₂</p>	<ul style="list-style-type: none">➤ Encher a proveta até um nível h.➤ 24 horas depois medir a altura h₂➤ Calcular a variação de volume <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;">$\Delta V = \frac{h_2 - h}{h} \times 100\%$</div>
<p>CALDA DE INJEÇÃO CORRENTE (NP EN 447)</p> <p>$-1 < \Delta V < +5\%$</p>	

4. Ensaio da resistência á compressão: Este ensaio pode ser realizado segundo as normas referidas, em 6 meios prismas resultantes do ensaio à flexão ou cilindros de 100mm de diâmetro e 100mm de altura. ou ainda, em determinadas situações provetes cúbicos. O resultado da resistência à compressão aos 28 dias terá que ser superior a 30 MPa ou 27 MPa aos 7 dias.

Note-se que o REBAP, ainda em vigor, prevê a utilização de cubos de 10cm de aresta para os quais a resistência à compressão aos 7 dias deverá ser superior a 17MPa.

Na Figura 87 apresentam-se gamas de valores recomendados por Nero (1998) em função da temperatura ambiente, para a fluidez (cone de Marsh), exsudação ao fim de 3 horas, variação de volume ao fim de 3 horas e resistência à compressão para determinada razão água/cimento.

4.4 TECNOLOGIA DE INJEÇÃO

A injeção é uma operação delicada onde surgem muitas dificuldades devendo ser cuidadosamente preparada no que se refere a equipamento, limpeza de bainhas, purgas, localização do equipamento, meios de recurso em caso de acidente, etc..

A injeção tem lugar após a operação de pré-esforço das armaduras e preparação das ancoragens para a injeção.

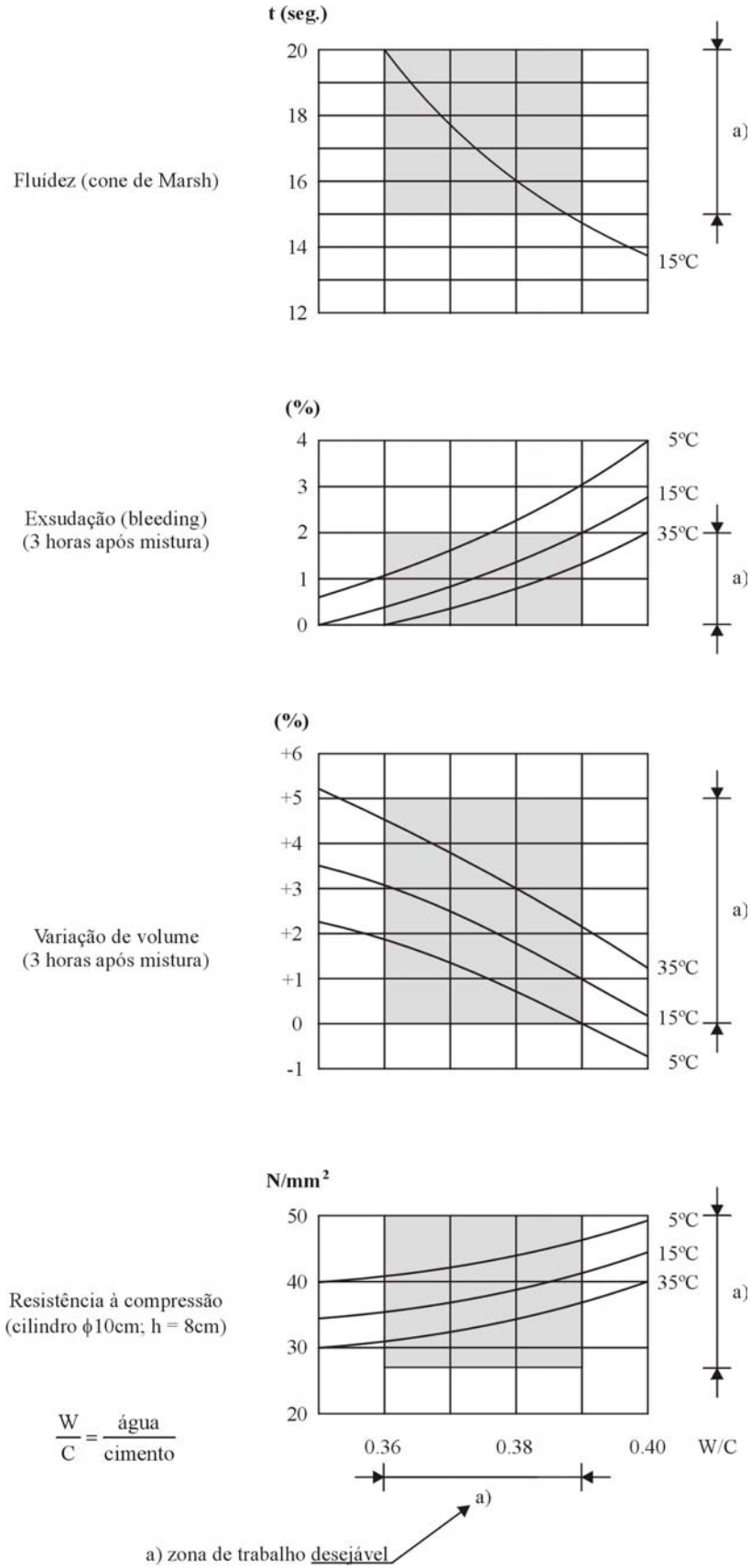


Figura 87 - Valores aconselháveis (Nero, 1998)

A operação de injeção requer pessoal especializado perfeitamente conhecedor das condições específicas da obra evitando-se a todo o custo improvisações.

O prazo entre o pré-esforço e a injeção deverá ser o mais curto possível.

Condições a verificar antes de iniciar os trabalhos de injeção:

- - o pré-esforço está completo e os relatórios aceites pela Fiscalização;
- - cumpridas as determinações da Fiscalização;
- - realizados os preparativos necessários;
- - equipamento e acessórios em boas condições;
- - materiais de consumo assegurados (cimento, água, adjuvante);
- - água sob pressão e compressor disponíveis junto dos trabalhos;
- - pessoal especializado e auxiliares em número suficientes;
- - verificada a livre passagem de ar nas bainhas e nas purgas;
- - purgas protegidas de danos durante os trabalhos;
- - escolhidas as posições da máquina de injeção.

Durante as operações de injeção o pessoal deverá estar protegido com óculos, luvas e aventais.

A temperatura ambiente ideal para realizar as operações de injeção ronda entre os 17° e 20°C devendo evitar-se temperaturas extremas superiores a 35°C e inferiores a 5°C sem tomar as devidas precauções (Nero, 1998).

4.5 INJEÇÃO PROPRIAMENTE DITA

A operação de injeção começa com os preparativos já atrás indicados no que se refere a equipamento, materiais, pessoal e localização da zona de trabalho.

- **verificação da bainha** → passar ar comprimido testando a livre passagem nas purgas
- **limpeza das bainhas** → passar água corrente após a primeira passagem de ar. Esta operação é dispensável se a permanência do aço na obra não é exagerada. Sempre que há limpeza deve-se extrair a água com uma segunda passagem de ar.
- **preparação da calda** → preparar calda em quantidade suficiente para injectar completamente um cabo no mínimo. A calda deve ser preparada de acordo com os ensaios prévios.

- **estabelecer as ligações** → depois de verificar a livre saída da calda ligar a mangueira da bomba ao dispositivo da ancoragem.
- **proceder à injeção** → ligar a bomba provocando a entrada de calda no interior da bainha. Deixar sair calda pelas purgas com consistência semelhante à da entrada fechando-as em seguida. Quando a calda atinge a purga final deixar sair nas condições anteriores e fechar. Continuar a injectar até atingir uma pressão da ordem de 0,5 a 0,7 MPa (5 a 7 kg/cm²) e manter a esta pressão. Fechar a entrada desligando a mangueira. O operador deverá estar atento à pressão indicada no manómetro. Aumentos de pressão alertam para problemas, normalmente bloqueios nas bainhas.

Deverá manter-se a velocidade de escoamento da calda no interior das bainhas o mais uniforme possível sendo de 6 a 12 m/minuto a gama de velocidades que conduzem a melhores resultado (Nero, 1998).

4.6 ANOMALIAS NA INJEÇÃO

Aparecem anomalias durante a operação de injeção sendo muito frequentes as relacionadas com o equipamento, bloqueios nas bainhas, fugas de calda por fissuras, etc..

Sempre que uma anomalia surge durante a injeção de uma bainha e não se consegue remediá-la em tempo oportuno proceder de imediato à lavagem da bainha com água em pressão e ar comprimido até conseguir saída de água limpa.

Não reutilizar calda saída das purgas nem aplicar calda com demasiado tempo de fabrico porque poderá originar problemas de sedimentação e consequentes bloqueios (Nero, 1998).

4.7 REINJEÇÃO (POST-GROUTING)

Corresponde a uma operação complementar de injeção com o fim de substituir vazios ocupados por ar ou água nas bainhas após injeção original (EN 446, 2000).

Deve-se evitar a todo o custo ter que recorrer a reinjeção. O seu custo é considerável e normalmente complica o bom andamento da obra.

Escolher criteriosamente os locais de implantação das ligações de reinjeção e correspondentes purgas de saída.

Fabricar uma calda com a menor razão água:cimento possível de modo a reduzir a exsudação.

Injectar com cuidado tendo em atenção que se tratam de pequenas quantidades de calda (Nero, 1998).

4.8 NOTAS FINAIS

O cimento, como elemento activo, tem muita influência nas propriedades da calda.

Sabe-se que determinados tipos de cimento têm reacções anómalas com adjuvantes pelo que se recomenda a execução de ensaios prévios sempre que se não disponha da experiência necessária de aplicações anteriores.

Não utilizar cimentos com menos de uma semana de fabrico nem cimentos de presa rápida devido ao risco de bloqueios.

Evitar cimentos com grânulos por vezes resultantes de tempo exagerado de armazenagem.

As operações de injeção são muito delicadas tendo que ser realizadas no final da execução da estrutura, habitualmente na fase da obra em que é muita a pressão para cumprimento de prazos, aconselhando-se a tomada de todos os cuidados indispensáveis de modo a assegurar o êxito dos trabalhos (Nero, 1998).

REFERÊNCIAS

“Construction Materials, Their nature and behaviour”, Ed. J.M. Illston, E&FN Spon, 1994.

Bauer, L.F., “Materiais de Construção 1” 4ª Ed., Rio de Janeiro, Brasil, 1992.

BCA – British Cement Association “Concrete and Environment”, Concrete Quarterly, Autumn, 1992.

Catita, J.A. “Mastersizer 2000, Basic user training”, Fevereiro 2006.

Coutinho, A de Sousa, “Fabrico e Propriedades do betão”, Volume 1, LNEC, 1988.

Domone, P.L. “Concrete – Constituent materials of concrete”, Chpt 13, Construction Materials; Their Nature and behaviour. Edt. By J.M. Illston, E&FN Spon, 1994.

Duriez, M., "Traité de Matériaux de Construction" Tome 1, Ed. Dunod, Paris, 1950.

- Dywidag – Systems International, VSL, International, Suíça, Edt, Theresa Wenger.
- Fib- Bulletin 28 – fédération internationale du béton CEB – FIB, “Environmental design – state of – the-art report, ISBN 2-88394-068-1, January 2004.
- Fidjestöl, P. e Lewis, R. “Microsílica as an addition”, Chapt. 12, Lea’s Chemistry of Cement and Concrete. Fourth Edt. Ed. By Peter C. Hewlett, Arnold, 1998.
- Geiker, M., “Durability design of concrete structures minimising total life cycle costs – considerations and examples”. Concrete Durability and Repair Technology, Proceedings of the International Conference – University of Dundee, Scotland. U.K., Edt., 1999 by R. Dhir and M. McCarthy.
- Glass, J. Ecoconcrete. The contribution of cement and concrete to a more sustainable built environment. BCA, 2001.
- Glasser, F.P. “The burning of Portland Cement”, Chapt 5. Lea’s Chemistry of Cement and Concrete. Fourth Edt. Ed. by Peter C. Hewlett, Arnold, 1998.
- Jackson, P.J., “Portland cement: classification and manufacture”. Chapt 2 Lea’s Chemistry of Cement and Concrete. Fourth Edt. Ed. by Peter C. Hewlett, Arnold, 1998.
- Johansen, V., “Cement production and cement quality”. Materials Science of concrete. Ed. J.P. Skalny, The American Ceramic Society, USA, 1989.
- Lawrence, C.D., “The constitution and specification of portland cements “, Chpt. 4, p. 167, Lea’s Chemistry of Cement and Concrete. Fourth Edt. Ed. By Peter C. Hewlett, Arnold, 1998.
- Massazza, F. “Pozzolana and Pozzolanic cements”. Chapt 10 Lea’s Chemistry of Cement and Concrete. 4th Edt. by Peter C. Hewlett, 1998.
- Mehta, P.K. "Mineral admixtures for concrete – an overview of recent developments". Advances in cement and concrete, Proceedings of an Engineering Foundation Conference, University of Newhampshire, Durham. ASCE, pp. 243-256, 1994.
- Mehta, K. Reducing the environment impact of concrete – concrete can be durable and environmentally friendly. Concrete International, pp 61-66, Out. 2001.
- Moreira, A.T., “Apontamentos das aulas teóricas de Materiais de Construção 2”, 1999.
- Nero, Gaspar “Materiais de Construção 1”. Associação de Estudantes do Instituto Superior Técnico, 1998/1999.

- Neville, A.M., “Properties of Concrete”, Fourth Edt, Longman, 1995.
- Oliveira, C.M. e Rodrigues, M., “Características de alguns gessos nacionais utilizados na construção civil”, TECNICA, nº 371.
- Regourd, M.M., “Cements made from blastfurnace Slag “Chapt. 11, Lea’s Chemistry of Cement and Concrete. Fourth Edt. Ed. By Peter C. Hewlett, Arnold, 1998.
- Sampaio , J.C., “Materiais de Construção” AEFEUP, Universidade do Porto, 1978.
- Sampaio, J, Sousa Coutinho, J. e Sampaio, M.N. "Portuguese rice husk ash as a partial cement replacement". Proceedings of the International Conference: Sustainable Construction into the next Millennium: Environmentally friendly and innovative cement based materials, Ed. N.P. Barbosa, R.N. Swamy and C. Lynsdale, pp. 125-137, João Pessoa, Brasil, 2-5 Nov. 2000.
- Sampaio, J, Sousa Coutinho, J. e Sampaio, M.N. “Melhoria do desempenho de betões pelo metacaulino”, IBRACON, 43º congresso brasileiro do Concreto, p. 244 – resumo, (trabalho em CD-Rom), Foz do Iguaçu, Brasil, 18-23 Agosto, 2001.
- Scrivener, K. “The Microstruture of Concrete”, Materials Science of Concrete I, edt. Skalny, J., “Materials Science of Concrete I”, The American Ceramic Society Inc., 1989.
- Soroka, I. “Concrete in hot environments”, E&FN Spon, National Building Research Institute, Faculty of Civil Engineering, Technion, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, 1993.
- Sousa Coutinho, J. “Agregados para argamassas e betões”. Edições DEC FEUP. 1999.
- Sousa Coutinho, J. “Ataque por sulfatos”, Mestrado de Estruturas de Engenharia Civil, FEUP, 2001.
- Sousa Coutinho, J. “Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem”. Melhoria da durabilidade dos betões, 488p., Porto: FEUP edições, 2005. – ISBN, 972-752-073-1.
- Sousa, Susana Patrícia Bastos, “Betões eco-eficientes com cinza de casca de arroz”, tese de mestrado, FEUP, 2005.
- VSL “Systèmes de Précontrainte” VSL International, VSL France.

Sites: Gesso

Escayola

Lafarge platres

DIY Guide – Using plasterboard

Pladur – www.uralita.com

Placosa – sistemas placoplatre

Knauff

Sites: Cal

www.guianet.pt/lusical

www.guianet.pt/calcidrata

www.zedland.co.uk

Sites : Cimentos

www.secil.pt

www.cimpor.pt