

CIMENTO PORTLAND

Engº HÉLIO MARTINS DE OLIVEIRA

Ex-Prof. de Materiais de Construção da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

3.1. DEFINIÇÃO

Cimento Portland é o produto obtido pela pulverização de *clinker* constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio natural, contendo, eventualmente, adições de certas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitam seu emprego.

O *clinker* é um produto de natureza granulosa, resultante da calcinação de uma mistura daqueles materiais, conduzida até a temperatura de sua fusão incipiente.

3.2. CONSTITUINTES

Os constituintes fundamentais do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃), certa proporção de magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO₃) que é adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega do produto. Tem ainda, como constituintes menores, impurezas, óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O), óxido de titânio (TiO₂) e outras substâncias de menor importância. Os óxidos de potássio e sódio constituem os denominados álcalis do cimento.

Cal, sílica, alumina e óxido de ferro são os componentes essenciais do cimento Portland e constituem, geralmente, 95 a 96% do total na análise de óxidos. A magnésia, que parece permanecer livre durante todo o processo de calcinação, está usualmente presente na proporção de 2 a 3%, limitada, pelas especificações, a um máximo permissível de 5%. No Brasil, esse limite é um pouco superior (6,4%). Os óxidos menores comparecem em proporção inferior a 1%, excepcionalmente 2%.

A mistura de matérias-primas que contenha, em proporções convenientes, os constituintes anteriormente relacionados, finamente pulverizada e homogeneizada, é submetida à ação do calor no forno produtor de cimento, até a temperatura de fusão incipiente, que resulta na obtenção do *clinker*. Nesse processo ocorrem combinações químicas, principalmente no estado sólido, que conduzem à formação dos seguintes compostos:

- silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$);
- silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$);
- aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$);
- ferro aluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$).

A análise química dos cimentos Portland resulta na determinação das proporções dos óxidos inicialmente mencionados. As propriedades do cimento são, entretanto, relacionadas diretamente com as proporções dos silicatos e aluminatos. As proporções destes últimos podem ser determinadas a partir do resultado da análise em óxidos. Denomina-se essa operação a determinação da composição potencial do cimento. Normalmente, usa-se para cálculo o chamado método de Bogue.

Nesse método, o cálculo parte da proporção total de cal, deduzindo-se, a princípio, as parcelas necessárias à formação do sulfato de cálcio e a cal livre, eventualmente encontrada. Determinam-se a seguir as proporções de cal necessária para a formação do ferro aluminato de cálcio, de aluminato tricálcico e de silicato bicálcico. O saldo na proporção original de óxido de cálcio é a seguir associado à proporção de silicato bicálcico já calculada, resultando na determinação da proporção atual de silicato tricálcico. A sobra de silicato bicálcico constitui o teor desse composto no cimento.

O cálculo pode ser feito dessa maneira, ou então resolvendo-se o sistema de equações que engloba a seqüência:

1. $\% \text{C}_3\text{S} = 4,07 \times \% \text{CaO} - 7,60 \times \% \text{SiO}_2 - 6,72 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 1,43 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3 - 2,85 \times \% \text{SO}_3$;
2. $\% \text{C}_2\text{S} = 4,07\% \times \% \text{CaO} - 7,60\% \times \% \text{SiO}_2 - 6,72\% \times \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 1,43 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3 - 2,85 \times \% \text{SO}_3$;
3. $\% \text{C}_3\text{A} = 2,65 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 1,69 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3$;
4. $\% \text{C}_4\text{AF} = 3,04 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Na Fig. 3.1 encontra-se um nomograma apropriado para o cálculo da composição potencial do cimento Portland pelo método de Bogue.

Esse método não conduz a resultados estritamente corretos para a composição potencial do cimento Portland, que varia em função das condições de operação do forno e do subsequente resfriamento do *clinker*. O encontro das correções apropriadas é objeto de trabalho de diversos investigadores, sendo, entretanto, aceita a aplicação pura e simples do método de Bogue como um instrumento de controle da mistura de matérias-primas no processo de fabricação do cimento.

A importância do conhecimento das proporções dos compostos constituintes do cimento reside na correlação existente entre estes e as propriedades finais do cimento e também do concreto.

O silicato tricálcico (C₃S) é o maior responsável pela resistência em todas as idades, especialmente até o fim do primeiro mês de cura. O silicato bicálcico (C₂S) adquire maior importância no processo de endurecimento em idades mais avançadas, sendo largamente responsável pelo ganho de resistência a um ano ou mais.

O aluminato tricálcico (C_3A) também contribui para a resistência, especialmente no primeiro dia. O ferro aluminato de cálcio (C_4AF) em nada contribui para a resistência.

Exemplo:

1. $SO_3 = 1,5\%$
 $CaO = 1,0\%$
 $CaSO_4 = 2,5\%$

2. $Fe_2O_3 = 4,9\%$
 $Al_2O_3 = 4,3\%$
 $CaO \text{ (livre)} = 1,0\%$
 $CaO = 8,8\%$
 $C_4AF = 15,0\%$
 $C_3A = 3,0\%$
 $CaO \text{ (livre)} = 1,0\%$

3. $CaO = 61,8\%$
 $SiO_2 = 24,0\%$
 $CaO \text{ anterior} = 10,8\%$

Diferença: $61,8 - 10,8 = 51,0\%$

$C_3S = 50,0\%$

$C_2S = 25,0\%$

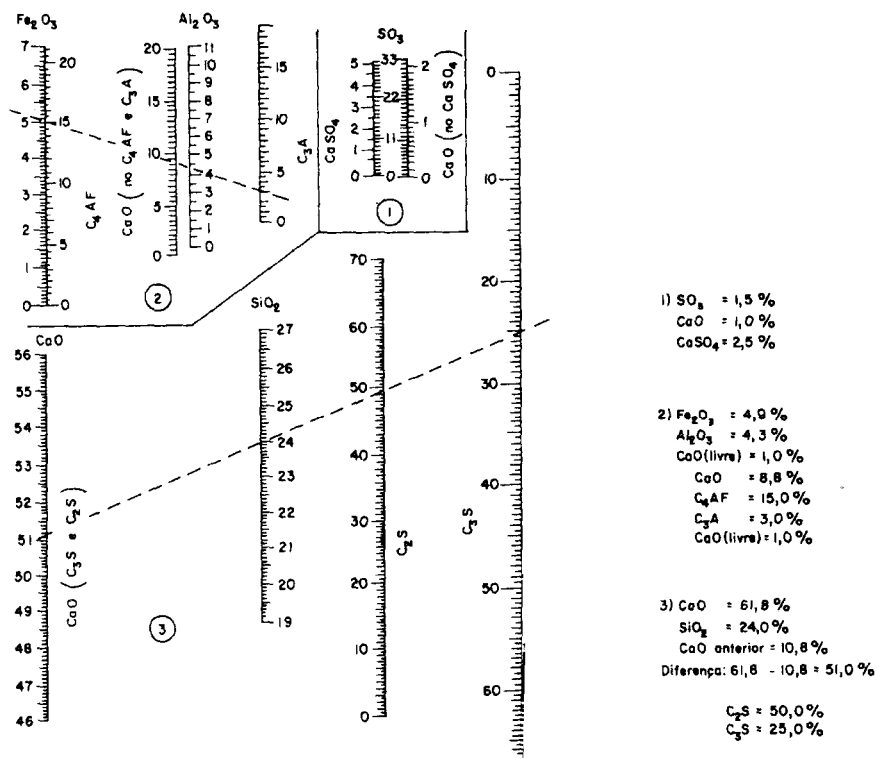


Fig. 3.1. Nomograma para o método de Bogue.

O aluminato de cálcio (C_3A) muito contribui para o calor de hidratação, especialmente no início do período de cura. O silicato tricálcico é o segundo componente em importância no processo de liberação de calor. Os dois outros componentes contribuem pouco para a liberação de calor.

O aluminato de cálcio, quando presente em forma cristalina, é o responsável pela rapidez de pega. Com a adição de proporção conveniente de gesso, o tempo de hidratação é controlado. O silicato tricálcico (C_3S) é o segundo componente com responsabilidade pelo tempo de pega do cimento. Os outros constituintes se hidratam lentamente, não tendo efeito sobre o tempo de pega.

3.3. PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas do cimento Portland são consideradas sob três aspectos distintos: propriedades do produto em sua condição natural, em pó, da mistura de cimento e água e proporções convenientes de pasta e, finalmente, da mistura da pasta com agregado padronizado — as argamassas.

As propriedades da pasta e argamassa são relacionadas com o comportamento desse produto quando utilizado, ou seja, as suas propriedades potenciais para a elaboração de concretos e argamassas. Tais propriedades se enquadram em processos artificialmente definidos nos métodos e especificações padronizados, oferecendo sua utilidade quer para o controle de aceitação do produto, quer para a avaliação de suas qualidades para os fins de utilização dos mesmos.

3.3.1. Densidade.

A densidade absoluta do cimento Portland é usualmente considerada como 3,15, embora, na verdade, possa variar para valores ligeiramente inferiores. A utilidade do conhecimento desse valor se encontra nos cálculos de consumo do produto nas misturas geralmente feitas com base nos volumes específicos dos constituintes. Nas compactações usuais de armazenamento e manuseio do produto, a densidade aparente do mesmo é da ordem de 1,5.

Na pasta do cimento, a densidade é um valor variável com o tempo, aumentando à medida que progride o processo de hidratação. Tal fenômeno; de natureza extremamente complexa, é conhecido pelo nome de *retração*. Esta ocorre nas pastas, argamassas e concretos. Pode atingir, em 24 horas, cerca de 7 mm por metro na pasta pura, 4,5 mm por metro na argamassa-padrão e 2 mm por metro em concretos dosados a 350 kg / cimento/m³. Dada a excepcional importância que o fenômeno da retração tem na tecnologia de concreto, ele será tratado pormenorizadamente no estudo das propriedades do concreto endurecido.

3.3.2. Finura.

A finura do cimento é uma noção relacionada com o tamanho dos grãos do produto. É usualmente definida de duas maneiras distintas: pelo tamanho máximo do grão, quando as especificações estabelecem uma proporção em peso do material retido na operação de peneiramento em malha de abertura definida, e, alternativamente, pelo valor da superfície específica (soma das superfícies dos grãos contidos em um grama de cimento).

A finura, mais precisamente a superfície específica do produto, é o fator que governa a velocidade da reação de hidratação do mesmo e tem também sua influência comprovada em muitas qualidades de pasta, das argamassas e dos concretos.

O aumento da finura melhora a resistência, particularmente a resistência da primeira idade, diminui a exsudação e outros tipos de segregação, aumenta a impermeabilidade, a trabalhabilidade e a coesão dos concretos e diminui a expansão em autoclave.

Exsudação é o fenômeno que consiste na separação espontânea da água de mistura, que naturalmente aflora pelo efeito conjunto da diferença de densidades entre o cimento e a água e o grau de permeabilidade que prevalece na pasta. É um tipo de segregação, fenômeno mais geral, entendido como separação dos diversos constituintes das argamassas e dos concretos por via de ação de diferentes causas, conduzindo, finalmente, a uma heterogeneidade indesejável. A coesão nos concretos e argamassas frescas é responsável pela estabilidade mecânica dos mesmos, antes do início da pega, e é medida pelo valor de resistência do cisalhamento.

Trabalhabilidade é uma noção subjetiva, aproximadamente definida como o estado que oferece maior ou menor facilidade nas operações de manuseio com as argamassas e concretos frescos. São todos atributos importantes das misturas frescas, tratadas minuciosamente no conteúdo correspondente às propriedades da mistura fresca.

A finura do cimento é determinada naturalmente durante o processo de fabricação para controle do mesmo, como também nos ensaios de recepção do produto, quando deve estar dentro dos limites determinados nas especificações correspondentes. As especificações brasileiras NBR 5732 (EB-I) e NBR 5733 (EB-2) prescrevem limite de retenção na peneira n.º 200 de malha de 75 micra de abertura. Para o cimento Portland comum, o resíduo deixado nessa peneira não deve exceder 15% em peso. Para os cimentos Portland de alta resistência inicial, tal índice deve baixar a 6%. A especificação admite, nesse caso, a determinação das Superfícies específicas pelo turbidímetro de Wagner, não devendo, então, ser superior a 1900 cm²/g o valor obtido para essa superfície.

As peneiras normalizadas empregadas na determinação da mistura de materiais pulverulentos têm características geométricas diferentes de um país para outro. No Brasil, são geralmente utilizadas as peneiras americanas padronizadas pela ASTM. Na Tab. 3.1 estão registrados alguns valores ilustrativos da série fina de peneiras padronizadas americanas. Na Ta.b. 3.2 estão também registrados alguns valores da série fina de peneiras padronizadas francesas.

Verificou-se ser impraticável a operação de separação de grãos de tamanhos inferiores a 60 micra. Desenvolveram-se, entretanto, processos indiretos de análises granulo métricas que se baseiam na medida de tempo de sedimentação de suspensões, na medida da permeabilidade à passagem de determinados fluidos através dos vazios intergranulares de amostras de cimento etc.

No processo de turbidímetro de Wagner é medido o tempo de precipitação dos grãos de diferentes diâmetros em suspensão no querosene. No processo de permeômetros de Blaine, mede-se o tempo de percolação de determinado volume de ar através dos vazios intergranulares de uma amostra de cimento de características definidas.

Tabela 3.1. *Série Fina de Peneiras Americanas*

Módulo	Abertura
18	1 mm
70	210 μ
100	149 μ
120	125 μ
140	105 μ
200	74 μ
230	62 μ
325	44 μ
400	37 μ

Tabela 3.2. *Série Fina de Peneiras Francesas*

Módulo	Abertura
31	1 mm
24	200 μ
23	160 μ
22	125 μ
21	100 μ
20	80 μ
19	63 μ
18	50 μ
17	40 μ

Na Fig. 3.2 está esquematizado o turbidímetro de Wagner. Nesse aparelho, uma fonte luminosa S, de intensidade constante, colocada no foco de um refletor parabólico R, emite um feixe de luz paralelo que atravessa uma cuba D, contendo a suspensão a estudar, emergindo diretamente sobre a placa sensível de uma célula fotelétrica P, ligada a um microamperômetro M. A cuba de água D é destinada a absorver os raios térmicos, e o anteparo E proporciona a formação de um feixe de abertura determinada. A turbidância da suspensão é definida pelo logaritmo da relação da intensidade da luz transmitida pelo meio líquido para a intensidade da luz transmitida pela suspensão. Esta última é sempre menor, em virtude da difusão proporcionada pelas múltiplas reflexões nas superfícies granulares. A turbidância da suspensão é relacionada pela superfície específica dos grãos presentes no trajeto do raio luminoso. Fazendo-se a medida da turbidância em diferentes tempos, no processo de decantação da suspensão, chega-se à determinação da superfície específica desejada.

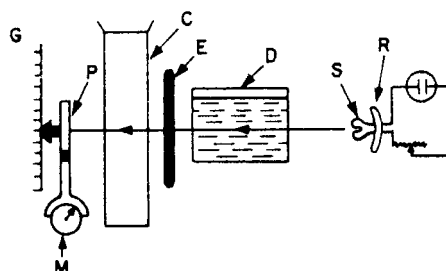


Fig. 3.2. Esquema do turbidímetro de Wagner.

No ensaio com o turbidímetro de Wagner, a amostra do cimento é peneirada na peneira de 325 malhas (44 micra) de abertura e depois submetida ao processo de decantação no querosene. A superfície específica é determinada com apreciável rapidez nesse processo, demorando cerca de 40 minutos um ensaio. Tal praticabilidade do ensaio conduziu a uma aceitação generalizada do mesmo, apesar de suas inerentes deficiências.

A correlação entre os valores da superfície específica, determinada por esse processo, e a resistência à compressão é precária. Apesar de tudo, o método se presta bem para as operações rotineiras de controle de fabricação.

Na Fig. 3.3 está esquematizado o aparelho de Blaine.

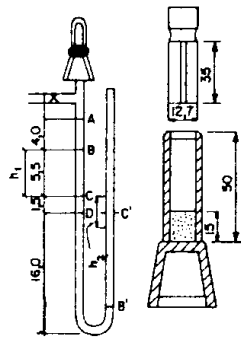


Fig. 3.3. Permeâmetro de Blaine.

Esse aparelho é composto de uma célula cilíndrica, de metal inoxidável, no fundo da qual repousa um pequeno disco perfurado, que suporta um pequeno disco de papel filtro. O cimento é introduzido nessa pequena cuba e comprimido por um pistão apropriado. Essa célula é fixada sobre um tubo em U, de cerca de um centímetro de diâmetro, dotado de quatro marcas, A, B, C e D. Na parte superior do traço marcado, existe uma derivação dotada de registro e ligada a um aspirador manual de borracha, tipo seringa. O tubo é enchido até a marca D com um líquido de densidade conhecida, geralmente um álcool. Colocada a amostra, o ar existente é aspirado pela seringa até que o líquido suba até a marca A. O registro é fechado e inicia-se a observação da queda da coluna, que corresponde a uma percolação de ar através de amostra contida na cuba superior. Mede-se o tempo correspondente à descida da coluna de D até P. A superfície específica da amostra é, então, determinada pela aplicação da fórmula de Keyes.

A superfície específica determinada por esses processos ou outros mais que existem conduz a valores de significado relativo, do ponto de vista de previsão para o comportamento do cimento examinado, isso porque, em tais processos, a distribuição do tamanho dos grãos não é perfeitamente considerada. Cimentos de procedências diferentes, com os mesmos valores de superfície específica, podem mostrar comportamento diverso, tanto quanto à resistência como quanto à exsudação. De qualquer forma, porém, cumpre salientar o inestimável valor desses ensaios no controle de fabricação, quando os parâmetros perturbadores permanecem os mesmos. É preciso destacar também que os diferentes processos de determinação da superfície específica resultam em números diferentes para o mesmo tipo de material ensaiado. Os valores determinados no processo de Blaine são usualmente 50% mais elevados que os determinados no processo de Wagner. Por exemplo: um cimento apresentou $2500\text{cm}^2/\text{g}$ no turbidímetro de Wagner e $3900\text{cm}^2/\text{g}$ no permeâmetro de Blaine.

3.3.3. Tempo de Pega.

O fenômeno da pega do cimento compreende a evolução das propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, propriedades essencialmente físicas, conseqüente, entretanto, a um processo químico de hidratação. É um fenômeno artificialmente definido como o momento em que a pasta adquire certa consistência que a torna imprópria a um trabalho. Tal conceituação se estende, evidentemente, tanto à argamassa quanto aos concretos nos quais a pasta de cimento está presente e com missão aglutinadora dos agregados.

No processo de hidratação, os grãos de cimento que inicialmente se encontram em suspensão vão-se aglutinando paulatinamente uns aos outros, por efeito de floculação, conduzindo à construção de um esqueleto sólido, finalmente responsável pela estabilidade da estrutura geral. O prosseguimento da hidratação em subseqüentes idades conduz ao endurecimento responsável pela aquisição permanente de qualidades mecânicas, características do produto acabado. A pega e o endurecimento são dois aspectos do mesmo processo de hidratação do cimento, vistos em períodos diferentes — a pega na primeira fase do processo e o endurecimento na segunda e última fase do mesmo. A partir de um certo tempo após a mistura, quando o processo de pega alcança determinado estágio, a pasta não é mais trabalhável, não admite operação de remistura. Tal período de tempo constitui o prazo disponível para as operações de manuseio das argamassas e concretos, após o qual esses materiais devem permanecer em repouso, em sua posição definitiva, para permitir o desenvolvimento do endurecimento.

A caracterização da pega dos cimentos é feita pela determinação de dois tempos distintos — o tempo de início e o tempo de fim de pega. Os ensaios são feitos com pasta de consistência normal, noção detalhada mais adiante, e, geralmente, com o aparelho de Vical. Nesse aparelho mede-se, em última análise, a resistência à penetração de uma agulha na pasta de cimento.

Têm sido tentados outros procedimentos para a medida de outras características físicas da mistura que conduzissem a uma melhor caracterização de fenômenos da pega. A medida da evolução do valor do atrito interno da pasta de cimento mostra claramente pontos de estreita correlação com os ensaios de penetração de agulha, confirmando,

pelo crescimento rápido desse valor no intervalo entre o tempo de início e o de fim de pega, a ocorrência de uma aglomeração de marcantes características mecânicas no interior da massa durante essa fase do processo de hidratação.

Medições feitas sobre os valores de velocidade de propagação do som durante o início de hidratação das pastas têm mostrado pontos característicos coincidentes com os tempos de início e fim de pega definidos por penetração de agulha. O mesmo ocorre no exame dos valores de resistência elétrica a correntes de alta frequência, onde as curvas também mostram pontos característicos coincidentes com os tempos de início e fim de pega. Não há dúvida de que, embora artificialmente definido o fenômeno, ele corresponde a uma realidade física caracterizada por pontos importantes no desenvolvimento do processo de endurecimento de aglomerante nos seus primeiros tempos de vida. Na Fig. 3.4 é representada a evolução dos valores das velocidades de propagação do som e da resistividade elétrica.

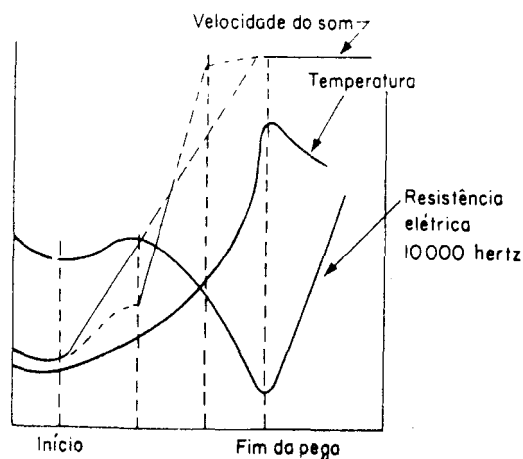


Fig. 3.4. Velocidade do som, temperatura, resistência elétrica e pega.

3.34. Pasta de Cimento.

A ocorrência da pega do cimento deve ser regulada tendo-se em vista os tipos de aplicação do material, devendo-se processar ordinariamente em períodos superiores a uma hora após o início da mistura. Nesse prazo são desenvolvidas as operações de manuseio do material, mistura, transporte, lançamento e adensamento. Há casos, entretanto, em que o tempo de pega deve ser diminuído ou aumentado.

Nas aplicações em que se deseja uma pega rápida, como, por exemplo, nas obturações de vazamentos, são empregados aditivos ao cimento, conhecidos com o nome de aceleradores de pega. Tais aditivos serão tratados mais adiante, cabendo, no momento, a citação de dois exemplos de aceleradores, o cloreto de cálcio e o silicato de sódio.

Contrariamente, em outros processos tecnológicos, ressalta-se a conveniência de um tempo de pega mais longo, como, por exemplo, nas operações de injeção de pastas e argamassas e nos lançamentos de concretos sob água, quando então se empregam aditivos denominados retardadores. Entre estes, citam-se os açúcares ordinários, a celulose e outros produtos orgânicos. Alguns cimentos oferecem raramente o fenômeno da falsa pega, que tem as características da pega ordinária, ocorrendo em período mais curto e não correspondendo, entretanto, à evolução já descrita para o fenômeno. Trata-se de uma anomalia, geralmente atribuída ao comportamento do gesso adicionado ao cimento, no processo de manufatura, e que pode ser corrigida por destruição do incipiente esqueleto sólido e formação mediante ação enérgica de mistura ou remistura.

O tempo de pega do cimento é determinado, como já foi dito, por ensaio do aparelho de Vicat. A pasta é misturada em proporção que conduz a uma consistência denominada normal. Essa consistência normal é verificada no mesmo aparelho de Vicat, utilizando-se a chamada sonda de Tetmajer, um corpo cilíndrico, metálico, liso, de 10 mm de diâmetro e terminado em seção reta. A sonda é posta a penetrar verticalmente em pasta fresca por ação de um peso total (incluindo a sonda) de 300g. Na Fig. 3.5 está representado o aparelho de Vicat.

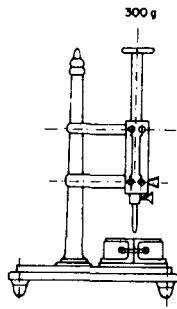


Fig. 3.5. Esquema do aparelho de Vicat.

No ensaio de consistência da pasta, a sonda penetra e estaciona a uma certa distância do fundo do aparelho. Essa distância, medida em milímetros, é denominada índice de consistência. A pasta, preparada para ensaios de tempo de pega, deve ter uma consistência normal de 6 mm, isto é, a sonda de Tetmajer deve estacionar à distância de 6 mm do fundo da amostra.

Essa amostra de consistência normal é ensaiada nesse mesmo aparelho à penetração de uma agulha corpo cilíndrico circular, com 1 mm² de área de seção e terminando em seção reta. A amostra é ensaiada periodicamente à penetração pela agulha de Vicat, determinando-se o tempo de início da pega quando esta deixa de penetrar até o fundo da pasta, ou melhor, ao ficar distanciada do fundo 1 mm. Os ensaios são prosseguidos até a determinação do tempo de fim de pega, quando a agulha não penetra nada mais na amostra, deixando apenas uma imperceptível marca superficial.

Na obra procede-se — quando necessário, por exemplo, para eliminar a suspensão de um cimento geralmente em processo muito lento de pega — a um ensaio grosseiro, que consiste na moldagem de uma série de pequenas bolas com pastas de consistência semelhante à normal de laboratório. Submetendo-as a posteriores esmagamentos com os dedos, quando o esmagamento deixa de ser plástico, tem-se, grosseiramente, o início da pega; quando as bolas se esfarinham por ação de esforço muito maior, tem-se o fim da pega.

3.35. Resistência.

A resistência mecânica dos cimentos é determinada pela ruptura à compressão de corpos-de-prova realizados com argamassa. A forma do corpo-de-prova, suas dimensões, o traço da argamassa, sua consistência e o tipo de areia empregado são definidos nas especificações correspondentes, e constituem características que variam de um país para outro.

Quase todos adotam cubos de arestas de 5 a 7 cm, predominando esta última dimensão. Apenas no Brasil e no Uruguai empregam-se corpos-de-prova de forma cilíndrica. No Brasil, o corpo-de-prova é um cilindro de 10cm de altura por 5cm de Ø. A consistência da argamassa é determinada pelo ensaio de escorregamento da argamassa normal sobre mesa cadente. O processo é descrito pormenorizadamente no método NBR 7215 (MB-1) da ABNT. Molda-se com argamassa um corpo-de-prova de formato tronco de cone, tendo como diâmetros das bases 125 e 80 mm e como altura 65 mm sobre uma plataforma lisa de um mecanismo capaz de promover quedas de 14 mm de altura. No ensaio são executadas trinta quedas em trinta segundos (ver Fig. 3.6).

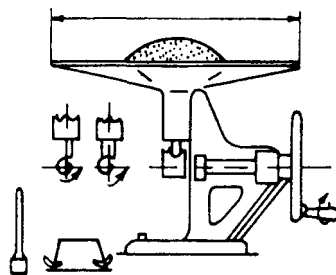


Fig. 3.6. Mesa cadente para ensaio de consistência.

A base inferior do cone moldado espalha-se, e a medida do diâmetro final é definida como índice de consistência da argamassa. Diz-se que a consistência é normal quando esse diâmetro alcança 165 mm.

A argamassa é constituída pela mistura de cimento e areia normal nas proporções de 1:3 em peso, materiais secos. A água a ser adicionada será determinada para se Conseguir a consistência normal anteriormente definida. O ensaio requer, portanto, algumas tentativas.

A areia utilizada nesse ensaio é a chamada areia normal, definida no método NBR 7215 (MB-I) como areia natural, proveniente do rio Tietê, em São Paulo, lavada e peneirada com a composição granulométrica fixada pela Tab. 3.3.

Tabela 3.3. Granulometria da Areia (NB-1)

<i>Materiais Retidos entre as Peneiras</i>	<i>Porcentagem em Peso</i>
2,4 - 1,2 mm	25
1,2 - 0,6 mm	25
0,6 - 0,3 mm	25
0,3 - 0,15 mm	25

Os corpos-de-prova assim executados são conservados em câmara úmida por 24 horas, e a seguir imersos em água até a data do rompimento. Este se processa, geralmente, nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias. Para o cimento Portland ordinário, a especificação brasileira NBR 5732 (EB.I) exige, aos três dias de idade, resistência mínima de 8 MPa. Aos sete dias, 15 MPa e, aos 28 dias, 25 MPa.

3.3.6. Exsudação.

A exsudação é um fenômeno de segregação que ocorre nas pastas de cimento. Os grãos de cimento, sendo mais pesados que a água que os envolve, são forçados, por gravidade, a uma sedimentação, quando possível. Resulta dessa tendência de movimentação dos grãos para baixo um aforamento do excesso de água, expulso das porções inferiores. Esse fenômeno ocorre, evidentemente, antes do início da pega. A água que se acumula superficialmente é chamada exsudação e é quantitativamente expressa como porcentagem do volume inicial da mesma, na mistura. É uma forma de segregação que prejudica a uniformidade, a resistência e a durabilidade dos concretos. Já foi dito que a finura do cimento influi na redução da exsudação, o que se compreende facilmente, considerando-se que a diminuição dos espaços intergranulares aumenta a resistência ao percurso ascendente da água.

34. PROPRIEDADES QUÍMICAS

As propriedades químicas do cimento Portland estão diretamente ligadas ao processo de endurecimento por hidratação. Ainda não se conhecem com muita precisão as reações e os compostos envolvidos no processo de endurecimento, restando muitas questões a serem esclarecidas. O processo é complexo, admitindo-se, atualmente, que se desenrole em desenvolvimentos que compreendem a dissolução na água, precipitações de cristais e gel com hidrólises e hidratações dos componentes do cimento.

Inicialmente, o silicato tricálcico (C_3S) se hidrolisa, isto é, separa-se em silicato bicálcico C_2S e hidróxido de cal. Este último precipita como cristal da solução supersaturada de cal. A seguir, o silicato bicálcico existente, resultante da hidrólise, combina-se com a água no processo de hidratação, adquirindo duas moléculas de água e depositando-se, a temperaturas ordinárias, no estado de gel. Esse processo, quando conduzido em temperaturas elevadas, resulta numa estrutura de natureza cristalina. Os dois últimos constituintes principais do cimento, o aluminato tricálcico e o ferro aluminato de cálcio, se hidratam, resultando, do primeiro, cristais de variado conteúdo de água e, do segundo, uma fase amorfa gelatinosa.

Esse processo é realmente rápido no *clinker* simplesmente pulverizado. O aluminato tricálcico presente é, de um modo geral, considerado o responsável pelo início imediato do processo de endurecimento. O produto, nessas condições, é de pega rápida. Como se sabe, o cimento, nessas condições, é material inútil para o construtor, impossibilitando qualquer manuseio pela rapidez da pega. Também é conhecido que a correção se efetua pela adição de sulfato de cálcio hidratado natural, gipsita, ao *clinker* antes da operação de moagem final. As investigações demonstraram que a ação do gesso no retardamento do tempo de pega se prende ao fato de ser muito baixa a solubilidade dos aluminatos anidros em soluções supersaturadas de gesso. O processo prossegue em marcha relativamente lenta pela absorção do sulfato, mediante a produção de sulfoaluminato de cálcio e outros compostos que, precipitados, abrem caminho para a solubilização dos aluminatos mais responsáveis pelo início da pega, já então em época conveniente.

O fenômeno de falsa pega não é ainda claramente compreendido. Admite-se, em geral, que as causas mais freqüentes da falsa pega são a desidratação do gesso a formas instáveis de sulfato de cálcio, ocorridas durante a operação de moedura, onde a temperatura se eleva acima de 130°C. Nessas circunstâncias, o cimento produzido contém sulfato de cálcio hidratável, que seria o responsável pela falsa pega.

34.1. Estabilidade.

A estabilidade do cimento é uma característica ligada à ocorrência eventual de indesejáveis expansões volumétricas posteriores ao endurecimento do concreto e resulta da hidratação de cal e magnésia livre nele presentes. Quando o cimento contém apreciáveis proporções de cal livre (CaO), esse óxido, ao se hidratar posteriormente ao endurecimento, aumenta de volume, criando tensões internas que conduzem à microfissuração, e pode terminar na

desagregação mais ou menos completa do material. Isso pode ocorrer quando prevalecem temperaturas superiores a 1900°C no processo de fabricação do *clinker* e resulta na supercalcinação da cal. Este óxido, como se sabe, hidrata-se de maneira extremamente lenta, conduzindo a indesejável expansão em época posterior ao endurecimento do material. Tal fenômeno ocorre com maior razão com o óxido de magnésio, motivo pelo qual as especificações limitam a proporção da presença desses constituintes no cimento.

Determina-se a estabilidade do cimento pelos ensaios de expansão em autoclave, onde a pasta de cimento é submetida a um processo acelerado de endurecimento em temperatura elevada, de modo a fazer aparecer, em sua provável grandeza, a expansão resultante da hidratação, tanto da cal quanto da magnésia livre. No Brasil, utiliza-se, para esse ensaio, a chamada agulha de Le Chatelier, que é constituída por uma forma cilíndrica de chapa de latão com 30 mm de altura e 30 mm de diâmetro, com uma fenda aberta segundo uma geratriz. Soldadas às bordas dessa fenda estão duas hastes destinadas a multiplicar a medida da abertura, que aumenta com a expansão do núcleo de pasta soldada no interior do cilindro. No método NBR 7215 da ABNT, esse ensaio é descrito em detalhe e é constituído, em linhas gerais, da moldagem, cura do corpo-de-prova imerso em água na temperatura ordinária, durante 12 horas, subsequente aquecimento do corpo-de-prova em água conduzida lentamente à fervura, durante cinco horas ou mais. O valor da expansibilidade é medido nas pontas das agulhas em milímetros, não podendo ultrapassar os limites descritos pelas especificação de qualidade do cimento (no Brasil, a NBR 5732 e a NBR 5733).

3.4.2. Calor de Hidratação.

Durante o processo de endurecimento do cimento, considerável quantidade de calor se desenvolve nas reações de hidratação. Essa energia térmica produzida é de grande interesse para o engenheiro, principalmente pela elevação de temperatura, resultante nas obras volumosas, a qual conduz ao aparecimento de trincas de contração ao fim do resfriamento da massa. O desenvolvimento de calor varia com a composição do cimento, especialmente com as proporções de silicato e aluminato tricálcicos.

O valor do calor de hidratação do cimento Portland ordinário varia entre 85 e 100 cal/g, reduzindo-se a 60 a 80 cal/g nos cimentos de baixo calor de hidratação.

Os valores do calor de hidratação dos constituintes do cimento são os seguintes:

C_3S — 120 cal/g

C_2S — 62 cal/g

C_3AF — 207 cal/g

C_4AF — 100 cal/g

Magnesia— 203 cal/g

Cal—279 cal/g

O método mais comum para a determinação do calor de hidratação do cimento é o calor de dissolução. Amostras secas de cimento em pó e de cimento parcialmente hidratado e subsequentemente pulverizado são dissolvidas em mistura de ácidos nítrico e clorídrico numa garrafa térmica. A elevação de temperatura devidamente corrigida pela eliminação dos fatores estranhos ao fenômeno determina as medidas do calor de dissolução das amostras. Por diferença, o calor de hidratação do cimento é calculado.

O interesse do conhecimento do valor do calor de hidratação do cimento reside na possibilidade do estudo da evolução térmica durante o endurecimento do concreto em obras volumosas. Basicamente, trata-se de multiplicar o calor de hidratação do cimento pelo peso do cimento contido no metro cúbico de concreto e dividir o resultado pelo calor específico do concreto. Esse cálculo aproximado não se desenvolve, evidentemente, com essa simplicidade esquemática, devendo ser considerados vários outros fatores que intervêm na evolução do fenômeno, tais como a velocidade de reação, o coeficiente de condutibilidade térmica do concreto, a variação do calor específico do concreto com a temperatura etc. Este assunto será desenvolvido no capítulo referente ao endurecimento do concreto.

34.3. Resistência aos Agentes Agressivos.

Nos concretos em contato com a água e com a terra podem ocorrer fenômenos de agressividade. As águas, como as terras, podem conter substâncias químicas suscetíveis a reações com certos constituintes do cimento presentes nos concretos. Nestes últimos, o cimento constitui o elemento mais suscetível ao eventual ataque, já que os agregados são de natureza predominantemente inerte. Os silicatos de cálcio mais ou menos hidratados e principalmente a cal hidratada, presentes no cimento hidratado, são os elementos submetidos a ataque químico. O hidróxido de cálcio presente na proporção de 15 a 20% do peso do cimento original constitui o ponto mais vulnerável.

As águas puras, de fontes graníticas ou oriundas do degelo atacam o cimento hidratado por dissolução da cal existente. Essa dissolução alcança cerca de 1,3 grama por litro nas temperaturas correntes. Águas puras renovadas acabam lavando toda a cal existente no cimento hidratado, após o que começam, com menor intensidade, a dissolver os próprios silicatos e aluminatos.

As águas ácidas, como, por exemplo, a água de chuva, com certa proporção de gás carbônico dissolvido, agem sobre a cal do cimento hidratado segundo processo que varia em função da concentração do anidrido carbônico. Se a concentração é baixa, o sal formado é o carbonato de cálcio, pouco solúvel, que obstrui os poros, constituindo proteção a ataques posteriores.

Se a concentração é relativamente forte, o carbonato formado é dissolvido como bicarbonato, prosseguindo o ataque até completa exaustão da cal presente. Os sais de cálcio são atacados em seguida.

As águas podem ser igualmente agressivas quando contêm outros ácidos, como acontece com os resíduos industriais e águas provenientes de charcos contendo ácidos orgânicos. Tanto num caso como no outro, há exaustão da cal, e um ataque posterior dos sais constituintes do cimento hidratado deixa no concreto um esqueleto sem coesão e inteiramente prejudicado nas suas características mecânicas e outras. Para estimar a resistência química d um cimento à água pura e ácida, é útil conhecer seu índice de Vicat, isto é, a relação sílica mais alumina dividida por cal. Se é inferior a 1, tem-se o cimento rico em cal, como o Portland, portanto, um cimento facilmente atacável. Se, ao contrário, o índice é superior a 1, cimento aluminoso, cimento metalúrgico, cimento pozolânico, trata-se de material pobre em cal e capaz de resistir à agressividade da água dissolvente.

A água sulfatada ataca o cimento hidratado por reação do sulfato com aluminato, produzindo um sulfoaluminato com grande aumento de volume. Essa expansão interna é responsável pelo fissuramento que, por sua vez, facilita o ataque, conduzindo o processo a completa deterioração do material. Águas paradas, contendo mais de meio grama de sulfato de cálcio/litro, e águas correntes com mais de 0,3 g podem, em geral, ser consideradas perigosas.

A água do mar contém numerosos sais em solução, entre os quais os sulfatos de cálcio, o sulfato de magnésio e o cloreto de sódio. A presença deste último contribui para aumentar a solubilidade da cal. O pequeno conteúdo de ácido carbônico contribui ligeira mente como medida de proteção, pela formação de carbonato insolúvel. Já os sulfatos, principalmente os de cálcio, agem da maneira já descrita, resultando no final ataque progressivo dos cimentos ricos em cal pelas águas do mar.

3.4.4. Reação Álcali-Agregado.

Identifica-se como reação álcali-agregado a formação de produtos gelatinosos acompanhada de grande expansão de volume pela combinação dos álcalis do cimento com a sílica ativa finamente dividida, eventualmente presente nos agregados. Trata-se de fenômeno estudado em época recente que, embora não tenha sido, até agora, constatado objetivamente no Brasil, por constituir importante risco na durabilidade dos concretos, merece detalhada investigação quando do uso de agregados oriundos de novas fontes, sem experiência anterior. Tal assunto será examinado no capítulo correspondente aos agregados.

3.5. CLASSIFICAÇÃO

Os cimentos foram originariamente fabricados segundo as especificações dos consumidores que encomendavam, das fábricas, o produto com certas Características convenientes a um trabalho. A partir de 1904, quando as primeiras especificações da ASTM foram introduzidas, a indústria limitou-se a produzir alguns tipos de cimento.

Em cada país, a indústria produz os cimentos padronizados pelo organismo normalizador nacional e alguns Outros fora de normas, mas sempre um número limitado de tipos. Não se encontram todos os tipos, entretanto, disponíveis no mercado. Muitos deles, destinados a usos especiais, são obtidos mediante encomenda.

No Brasil são produzidos vários tipos de cimento, oficialmente normalizados.

Fabrica-se também, para emprego ordinariamente não estrutural, o cimento branco, que é um cimento Portland ordinário, praticamente isento de óxidos de ferro, e que se consegue mediante cuidados adequados na escolha da matéria-prima e na condução do processo de fabricação. Na Tab. 3.4 são apresentadas as principais características dos cimentos normalizados brasileiros.

Tabela 3.4 Algumas Características Especificadas pela ABNT para Cimentos Brasileiros

Propriedades	Tipos	C.P. Comum			C.P. de Alta Resistência Inicial	C.P. de Alto Forno		C.P. Pozolânico		C.P. de Moderada Resistência a Sulfatos		C.P. de Alta Resistência a Sulfatos
		250	320	400		250	320	250	320	250	320	
Mg O máx. (%)		6,5	6,5	6,5	6,5	—	—	6,0	6,0	6,5	6,5	6,5
Perda ao fogo máx. (%)		4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Finura	Resíduo na peneira 0,075 (%)	15,0	15,0	15,0	06,0	10,0	10,0	12,0	12,0	15,0	15,0	15,0
	cm ² /g	2.400	2.600	2.600	3.000	2.600	2.800	2.500	2.900	2.600	2.600	2.600
Tempo mínimo de pega, Vicat (h)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Resistências mínimas argamassa normalizada (MPa)	01 dia	—	—	—	11	—	—	—	—	—	—	—
	03 dias	8	10	14	22	8	10	7	10	8	10	—
	07 dias	15	20	24	31	15	20	15	18	15	20	10
	28 dias	25	32	40	—	25	32	25	32	25	32	20
	90 dias	—	—	—	—	32	40	32	40	—	—	—
NORMA BRASILEIRA		NBR-5732 (EB-1)			NBR-5733 (EB-2)	NBR-5735 (EB-208)		(EB-758)		NBR-5737	NBR-5737	

Nos Estados Unidos são especificados cinco tipos principais de cimento Portland, cujas características mais importantes estão na Tab. 3.5.

Tabela 3.5. Algumas Características Especificadas pela ASTM para Cimentos Americanos

Propriedades	Tipos	1	2	3	4	5
		MgO máx. %	5,0	5,0	5,0	5,0
Perda ao fogo máx. %		3,0	3,0	3,0	2,3	3,0
Finura cm ² /g		1 600	1 700		1 800	1 800
Tempo de pega Vicat	Início	45	45	45	45	45
	Fim h máx.	10	10	10	10	10
Resistência à compressão da argamassa 1:2,75 MPa	1 d			8,7		
	3 d	6	5,2	17,5		
	7 d	12	10,4		5,6	10,4
	28 d	21	21		14	21

O cimento tipo 1 é o cimento Portland comum utilizado nos trabalhos gerais de construção, onde nenhuma das características diferenciadoras dos tipos restantes são exigidas e constituem um desenvolvimento natural do cimento fabricado antes de 1936, quando foi introduzida essa classificação.

O cimento tipo 2, freqüentemente conhecido como ‘modificado’, é um cimento com desenvolvimento moderado de calor de hidratação. Foi muito utilizado nas pavimentações antes do desenvolvimento da técnica de incorporação de ar, e recomendado para construções volumosas de porte moderado.

O cimento tipo 3 é o cimento de alta resistência inicial, diferindo do tipo 1 pela proporção mais elevada de C₃S e maior finura.

O cimento tipo 4, pouco utilizado atualmente, é um cimento de calor de hidratação muito baixo, destinado ao emprego em construções volumosas de grande porte. Isso é conseguido pela redução na proporção de C₃A e C₃S

O cimento tipo 5 é destinado ao emprego em obras onde a resistência ao ataque às águas sulfatadas é importante. Nesse produto a proporção de C₃A é substancialmente reduzida.

Os tipos 1, 2 e 3 são também especificados com a incorporação de agentes de *arrastamento de ar*, constituindo os tipos 1A, 2A e 3A. O agente incorporador de ar geralmente está presente na proporção de 0,01 a 0,03% e permite, nos concretos realizados com esses aglomerantes, a introdução, na mistura, de bolhas de ar de muito pequeno diâmetro, na proporção de 3 a 6% em volume.

De todos esses tipos de cimento, apenas os tipos 1 e 3, e mais raramente o 2, são normalmente encontrados em estoque.

Além desses tipos de cimento, fabrica-se, nos Estados Unidos, um cimento Portland ordinário de pega muito lenta, os cimentos de poços de petróleo, que devem endurecer em condições de temperatura a pressão muito elevada, o que se consegue mediante a adição de outros agentes retardadores que não o gesso. Da mesma forma, o cimento branco, que é uma variedade do cimento tipo 1, é encontrado normalmente no mercado americano, havendo também, em grau menor de disponibilidade, Outros tipos especiais constituídos de cimento tipo 1 com aditivos variados, como, por exemplo, os cimentos antibactericidas.

Na França encontra-se, provavelmente, a maior variedade na classificação de tipos de cimento. Na Tab. 3.6 apresentam-se algumas características dos principais produtos franceses. Os cimentos franceses são identificados por um símbolo cujo prefixo é uma associação de letras constituídas pelas iniciais do nome do produto, seguidas por um sufixo composto por um par de números que representam as resistências à compressão a 7 e a 28 dias, respectivamente, em MPa.

O supercimento 355-400 e o cimento de elevada resistência inicial (315-400) constituem os produtos de alta qualidade mecânica e pequena disponibilidade no mercado, preço mais elevado e emprego restrito aos casos não resolvidos pela aplicação do cimento Portland ordinário.

O cimento comum é fabricado nas classes CPA-250/315 e CPB-250/315, diferenciando-se um do outro pela adição de escória de alto-forno finamente dividida no produto CPB. Esses dois cimentos constituem o grosso da produção industrial francesa.

Tabela 3.6. *Algumas Características de Alguns Cimentos Franceses*

Cimento	Símbolo	Proporção de Escória	Compressão MPa			Tração MPa		
			2 d	7 d	28 d	2 d	7 d	28 d
Portland artificial	CPA-250/315	10%		25	31,5		2	2,5
Idem	CPB-250/315	10%		25	31,5		2	2,5
Alta resistência	HRI-315/400		16	31,5	40	1,8	2,5	3
Supercimento	Super		16	35,5	50		3	3,5
Metalúrgico	CMM-250/315	50%		25	31,5			

Encontram-se, a seguir, os chamados cimentos ao ferro CF-250/315, que uma variante do cimento comum, contendo, porém, de 20 a 30% de escória de alto-forno. Os tipos subsequentes, cimento metalúrgico misto, cimento de alto-forno e cimento de escória e clinker, são todos constituídos por mistura de cimento Portland comum CPA com proporções variadas de escória de alto-forno, que participa até com 80% da mistura no último cimento.

A escória de alto-forno finamente dividida não constitui propriamente um aglomerante hidráulico, podendo, entretanto, combinar com a cal livre existente no cimento Portland hidratado, endurecendo lentamente e proporcionando ao produto final qualidades que o capacitam a diferentes utilizações nas obras de construção.

3.6. FABRICAÇÃO

O cimento Portland é atualmente produzido em instalações industriais de grande porte, localizadas junto às jazidas que se encontram em situação favorável quanto ao transporte do produto acabado aos centros consumidores. Trata-se de um produto de preço relativamente baixo, que não comporta fretes a grandes distâncias. As matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento Portland são, usualmente, misturas de materiais calcários e argilosos em proporções adequadas que resultem em composições químicas apropriadas para o cozimento.

O condicionamento econômico do empreendimento, combinado com a natureza das jazidas disponíveis, determina os materiais que podem ser utilizados na manufatura do cimento Portland. Entre os materiais calcários utilizados encontram-se o calcário propriamente dito, conchas de origem marinha etc. Entre os materiais argilosos encontram-se a argila, xistos, ardósia e escórias de alto-forno.

A fabricação do cimento Portland comporta seis operações principais, a saber:

- extração da matéria-prima;
- britagem;
- moedura e mistura;
- queima;
- moedura do clinker;

— expedição.

A extração da matéria-prima se faz pela técnica usual de exploração de pedreiras, quando se trata de rochas e xistos; por escavação, segundo a técnica usual de movimentação de terras, quando se trata de argila, e por dragagens, quando é o caso. A técnica de exploração de pedreiras será desenvolvida mais adiante, quando se tratar da produção de agregados.

A matéria-prima, quando rochosa, é submetida a uma operação de beneficiamento com o propósito de reduzir o material à condição de grãos de tamanho conveniente. Trata-se da britagem, operação também comum no processo de exploração de pedreiras para a produção de agregados. Os materiais britados, calcário, por exemplo, são encaminhados a depósitos apropriados, de onde são processados segundo duas linhas principais de operação: via seca e via úmida.

No processamento por via seca, a matéria-prima é inicialmente conduzida a uma estufa, onde é convenientemente secada. Secos, os materiais argilosos e calcários são proporcionados e conduzidos aos moinhos e silos, onde se reduzem a grãos de pequeno tamanho em mistura homogênea.

Utilizam-se, para esse fim, moinhos, usualmente de bolas, associados em série e conjugados a separadores de peneira, ou ciclones, por cuja ação se conduz o processo na produção da mistura homogênea de grãos de pequeno tamanho, intimamente misturados, das matérias-primas.

Essa mistura é conduzida por via pneumática para os silos de homogeneização, nos quais a composição básica da mistura é quimicamente controlada e são eventualmente feitas às correções.

A mistura homogênea é armazenada em silos apropriados, onde aguarda o momento de ser conduzida ao forno para a queima.

No processo por via úmida, onde se emprega a argila natural como matéria-prima, esta é inicialmente misturada com água, formando uma lama espessa.

O calcário britado proveniente dos silos é proporcionado e misturado com a lama de argila e conduzido para os moinhos, também usualmente de bolas, onde a rocha calcária é reduzida a grãos de tamanho muito pequeno. Esses moinhos trabalham também com equipamentos separadores, neste caso, câmaras de sedimentação que proporcionam meio eficaz de controle dos tamanhos dos grãos de calcário em suspensão na lama.

A lama, após a operação de moedura do calcário, é bombeada para os silos de homogeneização, nos quais, como se procedeu na via seca, se controla a composição química e se fazem as eventuais correções. A mistura, devidamente controlada e homogeneizada, é conduzida para os silos de armazenamento do cru. Nesta altura, os dois processos novamente se encontram, procedendo-se à alimentação do forno, com a mistura pulverulenta proveniente da via seca ou com a lama proveniente da via úmida.

O forno, como é utilizado atualmente, é constituído por um longo tubo de chapa de aço, revestido internamente de alvenaria refratária, girando lentamente em torno de seu eixo, levemente inclinado, tendo na extremidade mais baixa um maçarico onde se processa a queima de combustível e recebendo pela sua boca superior o cru.

A operação de queima da mistura crua devidamente proporcionada num forno onde, pela combustão controlada de carvão, gás ou óleo, a temperatura é elevada aos níveis necessários à transformação química que conduz à produção do clinker, subseqüentemente resfriado, é, talvez, a mais importante fase na fabricação do cimento. O material submetido ao processamento das queimas percorre o forno rotativo de uma ponta a outra em cerca de 3 horas e meia a 4 horas. O clinker produzido sai do forno em elevada temperatura, incandescente, e é resfriado mediante corrente de ar ou mesmo por ação de água.

O clinker resfriado é conduzido a depósitos apropriados, onde aguarda o processamento da moagem.

A operação de moagem do clinker é realizada em moinhos de bola conjugados com separadores de ar. Sendo o clinker um material extremamente duro, a moagem é uma operação dispendiosa, onde são consumidas as esferas de aço duro utilizadas dentro do moinho.

O *clinker* entra no moinho já de mistura com a parcela de gipsita utilizada para controle do tempo de pega do cimento. Para facilitar a operação de moagem, a indústria manufatureira de cimento tem utilizado como aditivos certas substâncias que facilitam essa operação, os aditivos de ajuda na moagem.

O *clinker* pulverizado é conduzido pneumáticamente para os separadores de ar, um ciclone que reconduz ao moinho os grãos de tamanho grande e dirige os de menor tamanho, o cimento propriamente dito, para os silos de estocagem.

O produto acabado, o cimento Portland artificial, é então ensacado automaticamente em sacos de papel apropriado ou simplesmente encaminhado a granel para os veículos de transporte.

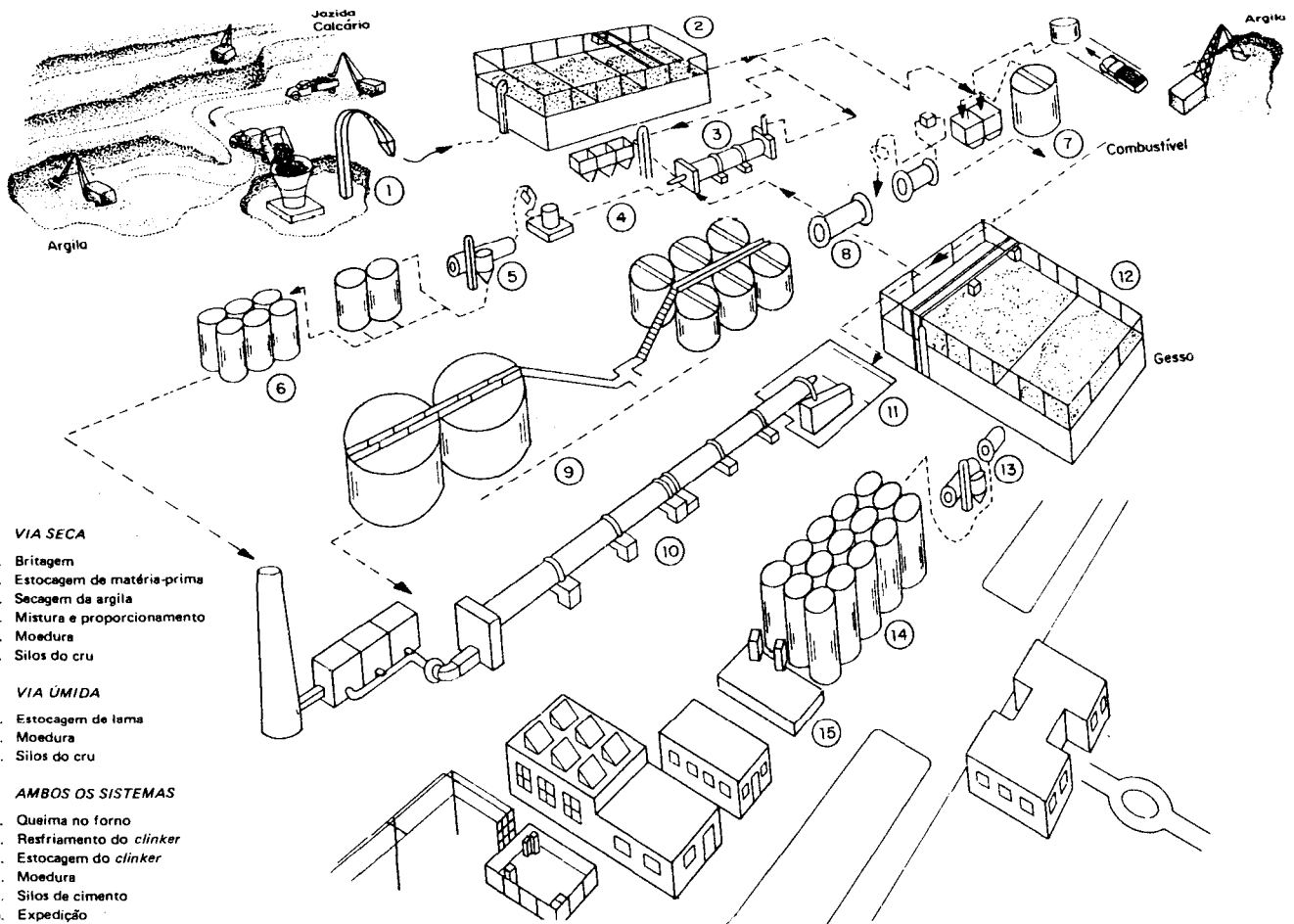


Fig. 3.7. Esquema da fabricação de cimento.

Fig. 3.7

A indústria de cimento é de grande porte, e entre as indústrias químicas, onde se classifica, não encontra nem de longe algum paralelo. O material movimentado se mede por milhares de toneladas por dia e o tamanho das peças de equipamento se mede pela potencia dos motores utilizados, milhares de HP.

A produção anual de cimento no mundo alcança 300 000 000 t, contribuindo o Brasil com cerca de 5 000 000 t. Na Fig. 3.7 está esquematizada a fabricação do cimento.

3.7. TRANSPORTE

A maior parte do cimento consumido em obras é transportada, ensacada, por via ferroviária ou rodoviária. Envolve tal operação perda por sacos rasgados, que alcança até 2%. Sendo o cimento um material de grande densidade e de baixo preço, o custo de frete incide de maneira ponderável. Resulta daí a necessidade de processar o transporte com utilização plena dos veículos, operando-se com partidas que ocupem a carga total de um vagão ou de um caminhão, conforme seja o caso. O transporte de parcelas menores que a capacidade do veículo onera desnecessariamente o custo do produto.

Como o preço do saco de papel contribui de maneira apreciável na formação do custo do cimento, procede-se, sempre que possível, ao seu transporte a granel. Há diversos sistemas apropriados para o transporte de cimento a granel, feito sempre em reservatórios metálicos estanques, quer sobre gôndola ferroviária, quer sobre chassis de caminhões. Diferenciam-se, porém, os processos de carga e descarga do material, utilizando-se sistema pneumático, de escorregamento e parafuso sem fim.

No sistema pneumático, o cimento é arrastado dentro de um tubo por forte corrente de ar. A sucção é processada no fundo do reservatório ou silo por dispositivo de arraste que se constitui por uma simples trompa de ar, conforme se observa na Fig. 3.8.

A alimentação da trompa de sucção é feita por gravidade, deslocando-se o cimento para a parte inferior do reservatório. Essa movimentação do material é facilitada por um processo curioso de fluidificação, obtida pela introdução de ar a baixa pressão nos vazios entre os grãos de cimento. O ar é introduzido através de janelas porosas localizadas em posição apropriada, conforme se vê na Fig. 3.8.

Quando se força a passagem de ar por percolação do volume de um material granuloso como o cimento, observa-se uma queda imediata no ângulo de atrito interno do material. No caso do cimento, o material em repouso tem um ângulo de atrito interno de cerca de 45° , oferecendo, então, uma resistência apreciável à sua movimentação. Com a introdução de ar nas condições descritas, esse ângulo baixa a um valor inferior a 5° , quando, então, o material se comporta quase como um líquido. Esse fenômeno, que é comum a todos os materiais pulverulentos, é muito usado na movimentação do cimento e se explica pela lubrificação conferida pelas bolhas de ar forçado nos vazios intergranulares.

O material succionado na trompa é arrastado dentro do tubo de maneira muito cômoda, pois o caminho não é limitado por elevações e curvas. O processo se aplica convenientemente bem na movimentação do material dentro das fábricas, cobrindo per cursos que alcançam mais de 300 metros, vencendo diferenças de altura da ordem de 30 a 40 metros. Usado na descarga de caminhões e vagões de transporte de cimento a granel, proporciona uma operação muito rápida. Um caminhão com 9 t pode ser descarregado em 9 minutos.

No processo de escorregamento, a descarga do veículo se faz por gravidade ao longo de uma calha interna, que corre pelo fundo do reservatório, neste caso um longo tanque, semelhante aos tanques de transporte de combustível (Fig. 39).

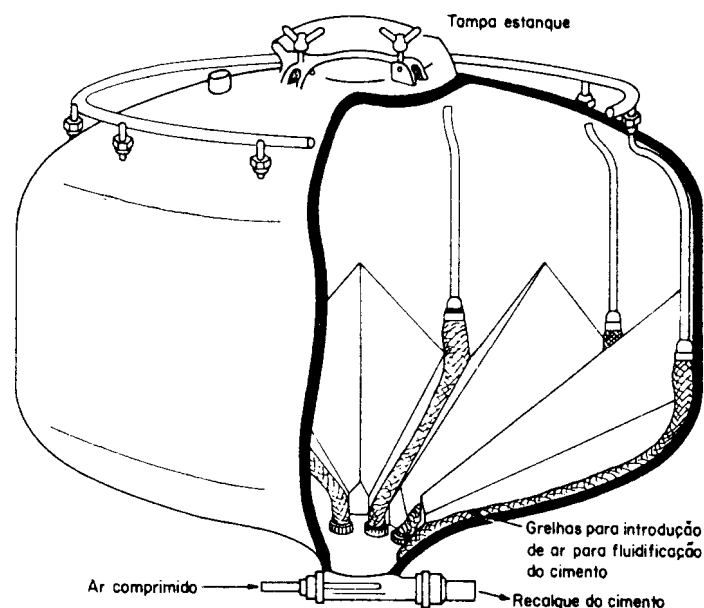


Fig. 3.8. Vaso para transporte de cimento a granel.

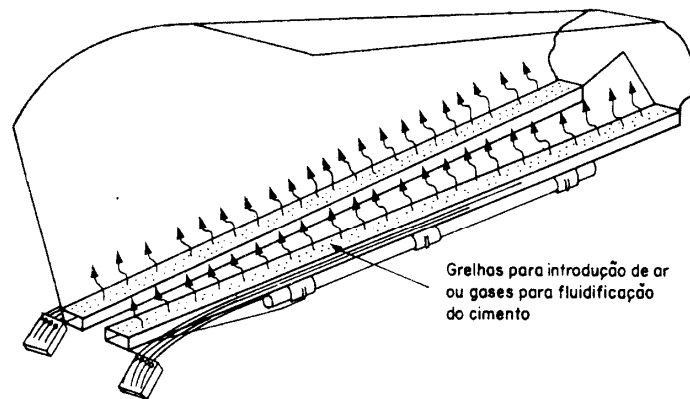


Fig. 3.9. Tanque para transporte de cimento a granel com descarga por escorregamento.

Essas calhas, embora de pequena inclinação, são constituídas de um material poroso, geralmente um tecido, através do qual o ar é forçado. Em virtude da fluidificação conferida ao cimento, ele escorrega com facilidade pelas calhas, esvaziando-se o reservatório em pouco tempo. Nesse processo, ocorre uma descarga de duas toneladas por minuto.

No sistema de parafuso sem fim, mais antigo, a descarga do veículo é levada a efeito pela ação de uma hélice longa, alojada na calha inferior que constitui o tubo do reservatório. A capacidade de descarga é menor e alcança cerca de 0,7 t/minuto.

Tais sistemas de transporte a granel são econômicos e se impõem no caso de grande consumo. No Brasil, esse gênero de transporte está sendo desenvolvido atualmente como consequência da fabricação local desse tipo de equipamento.

A quantidade mínima de consumo de cimento que permite a instalação de uma frota para o transporte a granel é da ordem de 200 t por mês, ou seja, 10 000 sacos de cimento por mês. O problema econômico é resolvido mediante uma análise dos custos de investimento e operação do equipamento de transporte em face da economia resultante da eliminação dos sacos de papel.

3.8. ARMAZENAMENTO

O cimento exige algum cuidado no seu armazenamento no canteiro de serviço. É necessário evitar qualquer risco de hidratação. Os sacos de papel não garantem a impermeabilização necessária, razão pela qual não se deve armazenar cimento por muito tempo. Os barracões para armazenamento de cimento devem ser bem cobertos e bem fechados lateralmente, devendo ser o soalho bem acima do nível do solo.

Para armazenagem por curto espaço de tempo, podem-se cobrir as pilhas de sacos de cimento com lona, sendo elas colocadas sobre estrados de madeira convenientemente elevados do solo. Não se recomenda o armazenamento de cimento por mais de três meses.

Quando se inicia a hidratação, o que se reconhece pela existência de nódulos que não se desmancham com a pressão dos dedos, o cimento torna-se suspeito. Pode ser usado, após peneiramento, somente em serviços secundários, como argamassas, pavimentos secundários etc.

3.9. CIMENTOS POZOLÂNICOS

Pozolanas são substâncias siliciosas e aluminosas que, embora não tendo qualidades aglomerantes próprias, reagem com a cal hidratada na presença de água, nas temperaturas ordinárias, resultando a formação de compostos cimentícios. Esses materiais podem ocorrer naturalmente ou ser produzidos em instalações industriais adequadas, sendo os primeiros encontrados como cinzas vulcânicas e os segundos resultantes do beneficiamento de argilas cozidas, cinzas volantes e algumas escórias. As pozolanas serão tratadas mais adiante, no capítulo referente aos agregados.

O emprego das pozolanas provavelmente é anterior ao início da História registrada. É possível que os antigos tenham descoberto seu uso por acidente, na operação de calcinação de calcários nas regiões vulcânicas, pela observação da melhoria introduzida no comportamento das argamassas que continham essa impureza. Depósitos de pozolanas naturais encontram-se próximos da cidade de Pozzuoli, perto do Vesúvio, na Itália. Estão hoje os restos de obras romanas, aquedutos feitos com concretos pozolânicos, a testemunhar a excelente durabilidade do material feito com esse constituinte.

Com o desenvolvimento da indústria de cimento Portland, a utilização das pozolanas foi abandonada, havendo, entretanto, uma tendência recente de intensificação do emprego desse material, traduzida no número significativo de obras realizadas com ele e mesmo na orientação de fabricantes de cimento, que iniciam a produção de cimentos pozolânicos englobando, já durante a manufatura, uma proporção desse material.

Não se conhece ainda o mecanismo da ação química entre as pozolanas e a cal presente no cimento hidratado, embora se admita que a sílica amorfa finamente dividida, presente nas pozolanas, reaja com a cal hidratada, produzindo, principalmente, silicato monocálcico.

O uso conveniente das pozolanas nos concretos de cimento Portland melhora muitas das qualidades desse material, como, por exemplo, a trabalhabilidade; além disso, diminui o calor de hidratação, aumenta a impermeabilidade, assim como a resistência aos ataques por águas sulfatadas, águas puras e águas do mar, diminui os riscos de reação alcali-agregado, a eflorescência por percolação de água e, finalmente, os custos.

De um modo geral, cerca de 20 a 40% do cimento utilizado nos concretos podem ser substituídos por pozolana sem diminuição da resistência mecânica final e com diversas melhorias nas qualidades do produto.

Os cimentos franceses tipo D, os cimentos metalúrgicos, os cimentos de escória franceses, americanos e alemães são, na realidade, cimentos pozolânicos. Na França, inicia-se a mistura de cinza volante aos cimentos Portland para a fabricação de cimentos com cinza. Essas cinzas volantes constituem um subproduto nas centrais termelétricas acionadas a carvão, constituindo a fase pulverulenta muito fina, arrastada pela fumaça das fornalhas das caldeiras e que, para não contaminar a atmosfera, são retidas em filtros especiais.

As pozolanas poderão, eventualmente, ser desenvolvidas no Brasil por beneficiamento das escórias de alto-forno, havendo, naturalmente, necessidade de estudos e experimentação, assim como de entendimentos com as usinas siderúrgicas.

Trata-se de assunto extremamente complexo a investigação do comportamento das pozolanas artificiais, uma vez que a sua constituição é muito variável. Não resta a menor dúvida de que a utilização das pozolanas se vai tornando uma imposição de natureza econômica e tecnológica, principalmente nas obras de grande envergadura, onde suas qualidades fazem melhor efeito. Não há, até o presente momento, qualquer tentativa de utilização desse material aqui no Brasil.

3.10. CIMENTOS ALUMINOSOS

O cimento aluminoso resulta do cozimento de uma mistura de bauxita e calcário. O cozimento é conduzido até a fusão completa, donde também o nome de cimento fundido. Esse cimento foi inventado em 1913, na França, como resultado da busca de um cimento mais resistente aos ataques químicos.

Verificou-se que ele atingia resistências espetaculares em pouco tempo, 31,5 MPa em dois dias, 35,5 em sete dias, 40 em vinte e oito dias. É um cimento de pega lenta, iniciando-se esta duas horas após a mistura. Tem excelentes qualidades e resistência ao ataque de águas sulfatadas, mas, em outros meios considerados menos nocivos, são, eventualmente, produzidas decomposições ainda mal-explicadas.

É um cimento refratário de primeira qualidade, podendo resistir a temperaturas superiores a 1 200°C e, em misturas com agregados convenientemente escolhidos, até acima de 1 400°C. Na realidade, é um cimento refratário por excelência.

A quantidade de água necessária à hidratação desse cimento se aproxima da quantidade necessária à formação de uma mistura trabalhável. As capacidades do produto final são, portanto, muito grandes, o que explica a melhoria nas suas características mecânicas. A reação é intensa, desenvolvendo grandes quantidades de calor.

O cimento aluminoso é empregado principalmente como cimento refratário. Não se fabrica esse produto no Brasil.

3.11. CIMENTO NATURAL

Denomina-se cimento natural ao produto resultante do cozimento de rochas calcárias argilosas em temperaturas abaixo da fusão, cerca de 1 000°C. Esse produto, quando tem pega rápida, recebe o nome de cimento romano, denominação imprópria, como se vê. Tais produtos oferecem apenas interesse histórico, uma vez que já não são fabricados em parte alguma.

3.12. ÍNDICES E MÓDULOS

Na literatura consagrada ao estudo dos aglomerados hidráulicos, e particularmente dos cimentos, é freqüente o encontro de limites estabelecidos para as proporções dos diferentes constituintes, no propósito de relacionar tais valores com as características do produto. Entre elas encontra-se o índice de hidraulicidade de Vicat, que é a relação entre as somas das porcentagens de materiais argilosos e a porcentagem de cal:

$$I = \frac{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{CaO}}$$

Vicat afirmava que as propriedades hidráulicas dos aglomerantes estavam relacionadas com o valor desses índices, figurando o cimento artificial de pega lenta com um índice compreendido entre 0,5 e 0,65.

Le Chatelier estabeleceu para proporção máxima do óxido de cálcio nos constituintes do cimento a seguinte relação:

$$\% \text{CaO máx.} = 2,8 \%, \text{SiO}_2 + 1,64 \%, \text{Al}_2\text{O}_3 .$$

Com isso, pretendia limitar a presença de cal livre no produto acabado, elemento responsável pela expansão indesejável nos concretos.

O módulo hidráulico de Michaelis é uma relação semelhante ao índice de hidráulidade de Vicat'

$$M = \frac{\% \text{ CaO}}{\% \text{ SiO}_2 + \% \text{ Al}_2\text{O}_3 + \% \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

O objetivo desse módulo é também semelhante ao índice de Vicat, isto é, limitar a proporção dos constituintes de acordo com as qualidades finais do aglomerante.

Muitas outras relações, índices, módulos etc., encontram-se, como já foi dito, na literatura especializada, representando sempre esforços de simplificação do problema geral de dosagem dos constituintes na fabricação dos cimentos. Na Tab. 3.7 estão relacionados alguns aglomerantes com o inverso do módulo de Michaelis.

Tabela 3.7. Aglomerantes e Inverso do Módulo de Michaelis

Nome		Matéria-Prima	$\frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO}}$	
Cal aérea		Calcário pouco argiloso	0,1	
Cal hidráulica		Calcário argiloso	0,10 - 0,50	
Cimento	Natural		Pega lenta	0,50 - 0,65
		Pega rápida	0,60 - 0,80	
	Artificial	Pega lenta	Mistura	0,45 - 0,50
		Pega rápida	Calcário-argila	0,60 - 0,80

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BÂTIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS.
2. BAUER, E. E. — Piam Concrete. New York, McGraw-Hill, 1956.
3. BLANKS, R. F. & KENNEDY H. L. — The Technology of Cemeni and Concrete. New York, John Wiley & Sons, 1955. 2v.
4. PETRUCCI, ELÁDIO G.R. — Concreto de Cimento Poriland. Editora Globo, 1978.
5. CALLEJA, C. JOSÉ. — Conglomerantes Hidráulicos: Físicoquímica e Tecnologia, Monografia n.º 214 Madrid, IETCC, 1961.
6. CALLEJA C. JOSÉ. —Ciclo de Palestras. São Pauto, — FTDE/EPUSP/IPT, 1979.
7. LABLAU, O. —Prontuário d Cimento. Ed. TécnicosAssociados, 1970.
8. VENUAT, M. — Cimento et Bétons. Prcsaes Universitaires de France, 1973.
9. VENUAT, M. & PAPADAKIS, M. — Con:rolyEnsayo de Cementos, Morteros y Hormigones. UR.M.O., 1964.
10. DUDA, W.H.—Manual Tecnológico de Ce,nento. ETA 1977.

TECNOLOGIA DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO
CIMENTO PORTLAND
TURMA N01

NOME:

EXERCÍCIOS

1. Citar quais os compostos provenientes da fusão das matérias-primas para a fabricação do cimento Portland (clinker) e quais as suas principais propriedades.

2. Quais as principais propriedades físicas de um cimento Portland?

3. Quais as categorias e tipos de cimento existentes no Brasil?

4. Em que fase da fabricação do cimento Portland é adicionado gipsita, e com que finalidade?

5. Quais os principais cuidados que devem ser tomados na armazenagem, em obra, de cimento

6. Quais as principais propriedades da pozolana utilizada como adição, em cimento Portland?

7. Quais as principais propriedades de um cimento aluminoso?