

# O projeto de instalações de moagem de carvão

Afrânio Franco Machado \*

1. INTRODUÇÃO
2. PROCESSOS DE MOAGEM DE CARVÃO
3. CRITÉRIOS DE PROJETO
4. A SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS E  
EXPLOSÕES
5. CASO DO PROJETO DE UMA INSTALAÇÃO  
INDUSTRIAL
6. BIBLIOGRAFIA

\* Engenheiro de Processos da Paulo Abib  
Engenharia S/A



## Resumo

A utilização do carvão mineral e do carvão vegetal vem sendo estimulada no Brasil como fontes energéticas alternativas ao óleo combustível.

O trabalho contempla o estudo dos processos de moagem de carvão com vistas à sua adequação à combustão em fornos.

A operação unitária de moagem de carvão envolve vários aspectos relativos à diversidade de tipos de carvões existentes. Por essa razão, serão tecidas considerações sobre manuseio, homogeneização, segurança contra incêndio e explosões e controle de

poluição ambiental.

Como a indústria cimenteira é um dos grandes consumidores de energia, além de se tratar de uma área onde a aplicação tanto do carvão mineral como do vegetal encontra ampla viabilidade técnico-econômica, é a respeito dela que se norteará o trabalho. Será feita uma revisão da literatura especializada no assunto.

Apresentar-se-á o projeto de uma instalação brasileira de carvão, elaborado pela PAULO ABIB ENGENHARIA S.A. Serão tratados dentre outros os seguintes itens: critérios e premissas adotados para o projeto, balanços de massa e energia, fluxograma de processo, instrumentação e controle e colocação em funcionamento ("start up") da instalação.

## 1. Introdução

A utilização de carvão mineral e carvão vegetal como combustíveis alternativos vem sendo estimulada pelo governo brasileiro como uma das opções para libertar o país da dependência de fontes alienígenas de fornecimento de óleo combustível.

A combustão do carvão para a geração de calor pode ser feita, seja na forma de material granulado, seja aglomerado como pelotas ou briquetes, ou ainda finamente dividido na forma de pó. A combustão de carvão moído é a maneira mais eficiente de queima do carvão, na qual somente um pequeno excesso de ar é necessário para produzir chamas sem emissão de fumaça e com altas temperaturas.

Por se tratar de um bem mineral, no caso do carvão mineral, e de uma biomassa, como o carvão vegetal, esses energéticos se diferenciam basicamente dos combustíveis líquidos e gasosos pelas dificuldades que apresentam para preparação, manuseio, estocagem e transporte.

Os problemas associados à moagem do carvão para sua combustão em fornos serão tratados aqui, enfocando os aspectos de Engenharia de Processo e de Projeto.

A concepção das modernas instalações de moagem de carvão deve levar em conta a segurança do sistema contra possíveis

acidentes decorrentes de incêndios e explosões. Deve haver também a preocupação de evitar agressões ao meio ambiente, seja através de emissão de poeiras seja pelo excesso de ruídos.

Analisaremos no trabalho o caso prático de uma instalação de moagem de carvão, para atender a uma fábrica de cimento, já em funcionamento, tanto no que diz respeito à concepção do projeto, como à colocação em operação da unidade industrial.

## 2. Processos de moagem de carvão

As técnicas de moagem de carvão não são novas. Na fabricação de cimento, o carvão foi utilizado anteriormente ao óleo combustível, sendo durante muitos anos o principal combustível empregado na Europa. Assim é que, em 1960, 80% do consumo total de energia sob a forma de calor nas fábricas de cimento européias, era suprido pelo carvão mineral. Em 1973, quando eclodiu o embargo dos árabes à venda do petróleo aos preços vigentes, a participação do carvão na geração total de calor havia caído para 3%. A explicação para essa mudança ocorrida em apenas 13 anos, está nos baixos custos da calorica proveniente do óleo, a par da facilidade de sua utilização nas instalações de combustão.

Justifica-se na atualidade, em virtude da nova ordem econômica mundial, a retomada do velho combustível - o carvão. Sobretudo no caso brasileiro, a grande dependência do óleo vindo do exterior, nos torna um alvo indefeso da crise que por ora atravessamos e das demais que no futuro certamente nos atingirão. Impõe-se-nos dessa maneira o recurso de caminhar para a auto-suficiência energética da nação, seja através do aumento da produção de petróleo doméstico, seja pela utilização de fontes energéticas alternativas.

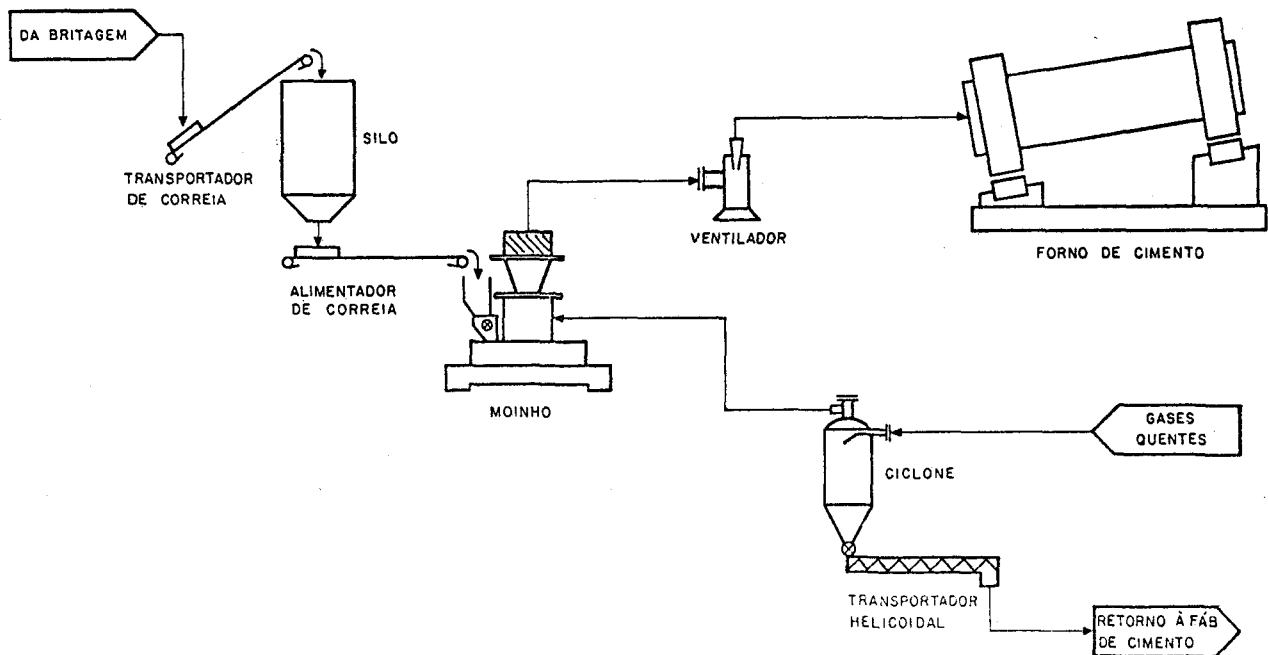
Naturalmente as técnicas de moagem do carvão adotadas anteriormente foram revisadas, com o objetivo de se adequarem às modernas exigências de segurança, de controle ambiental e de eficiência operacional dos equipamentos.

Basicamente são três os processos de queima de carvão para a fabricação de cimento, a saber:

## 2.1. Processo de queima direta

No processo de queima direta, o carvão é secado, moído e em seguida injetado no forno junto com os gases da secagem. Trata-se de uma concepção de baixo custo de investimento,

FIGURA 1 - Fluxograma de processo Queima direta



## 2.2. Processo de queima semi-direta

No processo de queima semi-direta, o pó de carvão é separado em um silo intermediário, enquanto os gases efluentes são transportados ao forno de cimento junto com carvão retirado do silo, servindo também como ar primário de combustão.

Há uma certa vantagem sobre o processo de queima direta, em virtude do estoque intermediário de carvão, tornando o forno de cimento menos dependente da operação da instalação de moagem de carvão.

Podemos ter uma melhor idéia do processo através do fluxograma apresentado na figura 2.

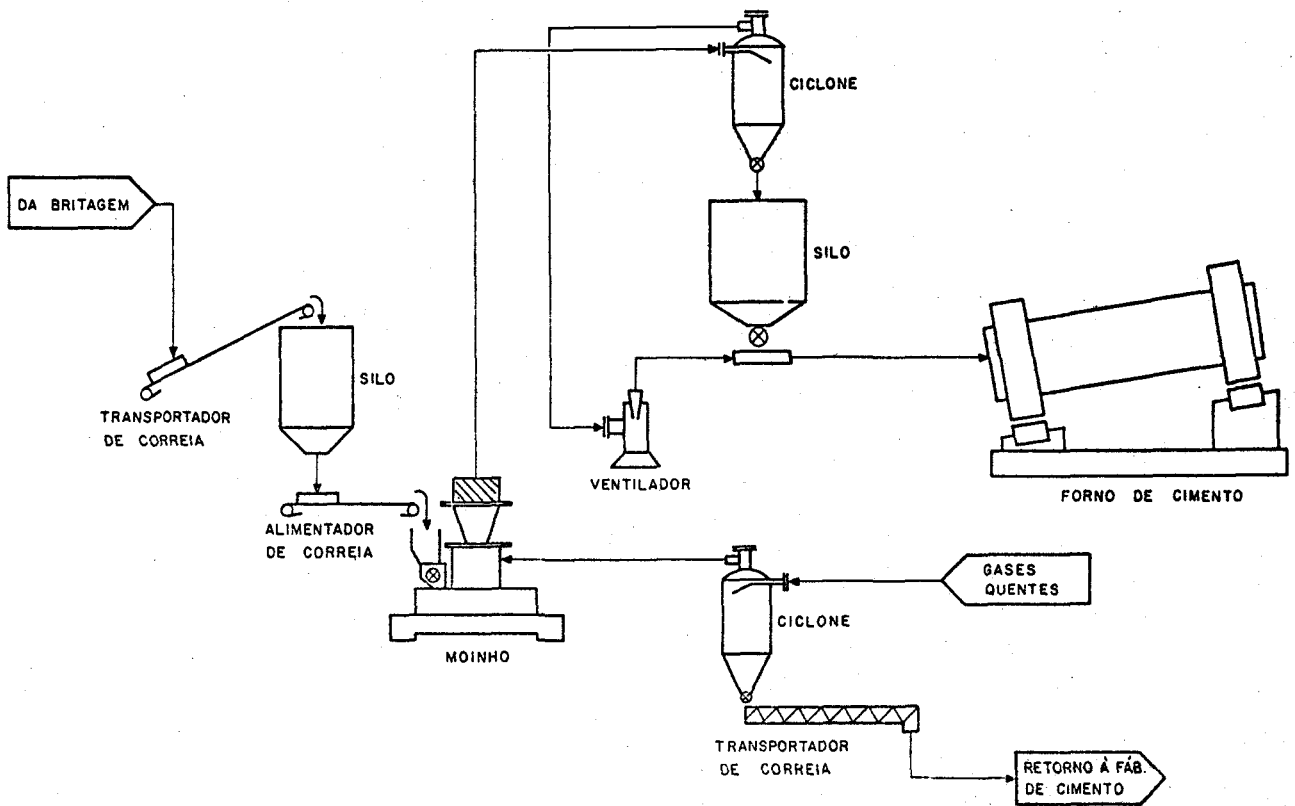
devido à inexistência de um sistema de despoeiramento e recirculação de gases ao moinho, conforme se observa pelo fluxograma apresentado na figura 1. Como uma vantagem adicional, há uma maior segurança na operação do circuito, não havendo necessidade de controles específicos, tais como controles de temperatura, de pressão, de teores de CO e O<sub>2</sub>. Estima-se que o custo de investimento seja 40% menor do que aquele de uma instalação para queima indireta, a ser descrita mais adiante, com a mesma capacidade de moagem.

O regime de operação do forno de cimento se torna muito dependente da disponibilidade da instalação de moagem, o que é prejudicial sob o ponto de vista do operador do forno, podendo-se transformar a operação de moagem no gargalo da produção de cimento. Por outro lado, como a umidade evaporada do carvão é transportada nos gases sob a forma de vapor d'água, juntamente com o carvão seco, e injetada no maçarico, a temperatura de chama é abaixada. Estima-se que cada 1% de umidade contida no carvão é capaz de abaixar a temperatura de chama de 10°C a 14°C, diminuindo-se como consequência a produção do forno. É sabido que um aumento de 10°C na temperatura de chama corresponde a um aumento na produção do forno de pelo menos 1%. (2)

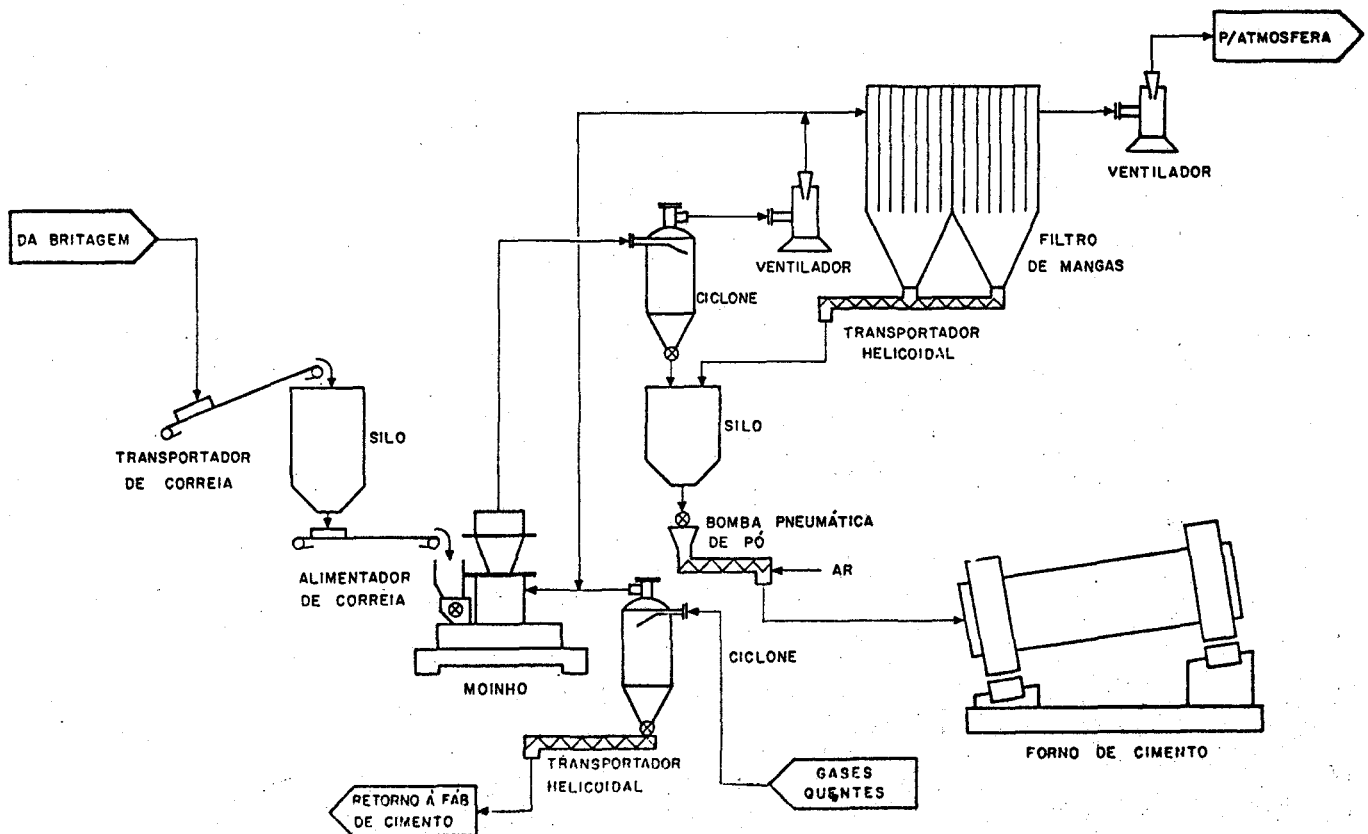
## 2.3. Processo de queima indireta

É o sistema mais versátil existente sob o ponto de vista da disponibilidade de carvão moído para suprimento ao forno de cimento. O fluxograma da figura 3 nos mostra que o carvão moído depositado no silo é transportado pneumaticamente sem o concurso dos gases de secagem. O sistema de queima pode assim ser operado com uma vazão de ar primário bem controlada, com o objetivo de gerar uma chama com características ideais. Por outro lado, a instalação de moagem pode parar de funcionar, enquanto o sistema de transporte de carvão moído mantém a alimentação do maçarico.

**FIGURA 2 - Fluxograma de processo**  
**Queima semi-direta**



**FIGURA 3 - Fluxograma de processo**  
**Queima indireta**  
**Tomada de gasesde recirculação antes do filtro de mangas**



A desvantagem do processo reside na necessidade de instalação do filtro e do silo de carvão moído, exigindo-se em consequência a instalação de equipamentos de controle, para monitorar os parâmetros de segurança do sistema, e de equipamentos de supressão de incêndios, além de medidas para evitar danos que eventualmente poderiam acontecer no caso de explosões.

Dentro do processo de queima indireta, poderíamos distinguir três variações básicas:

### 2.3.1. Tomada dos gases de recirculação antes do filtro de mangas

Essa versão coincide com o fluxograma apresentado na figura 3.

As vantagens apresentadas para o caso são as seguintes:

- a - baixa carga de pó no filtro;
- b - altas taxas de filtração são possíveis, com conseqüente redução do tamanho do filtro.

Podemos alinhar como desvantagens os seguintes pontos:

- a - ocorrência de partículas finas no fluxo gasoso de recirculação ao moinho, com

possibilidades de ignição do pó ao entrar em contato com os gases quentes;

- b - somente as partículas finas são encaminhadas ao filtro, tornando-o favorável a incêndios e/ou explosões, devido às características altamente reativas das partículas.

### 2.3.2. Tomada dos gases de recirculação após o filtro

Essa concepção tem sido adotada em algumas instalações e apresenta as seguintes vantagens:

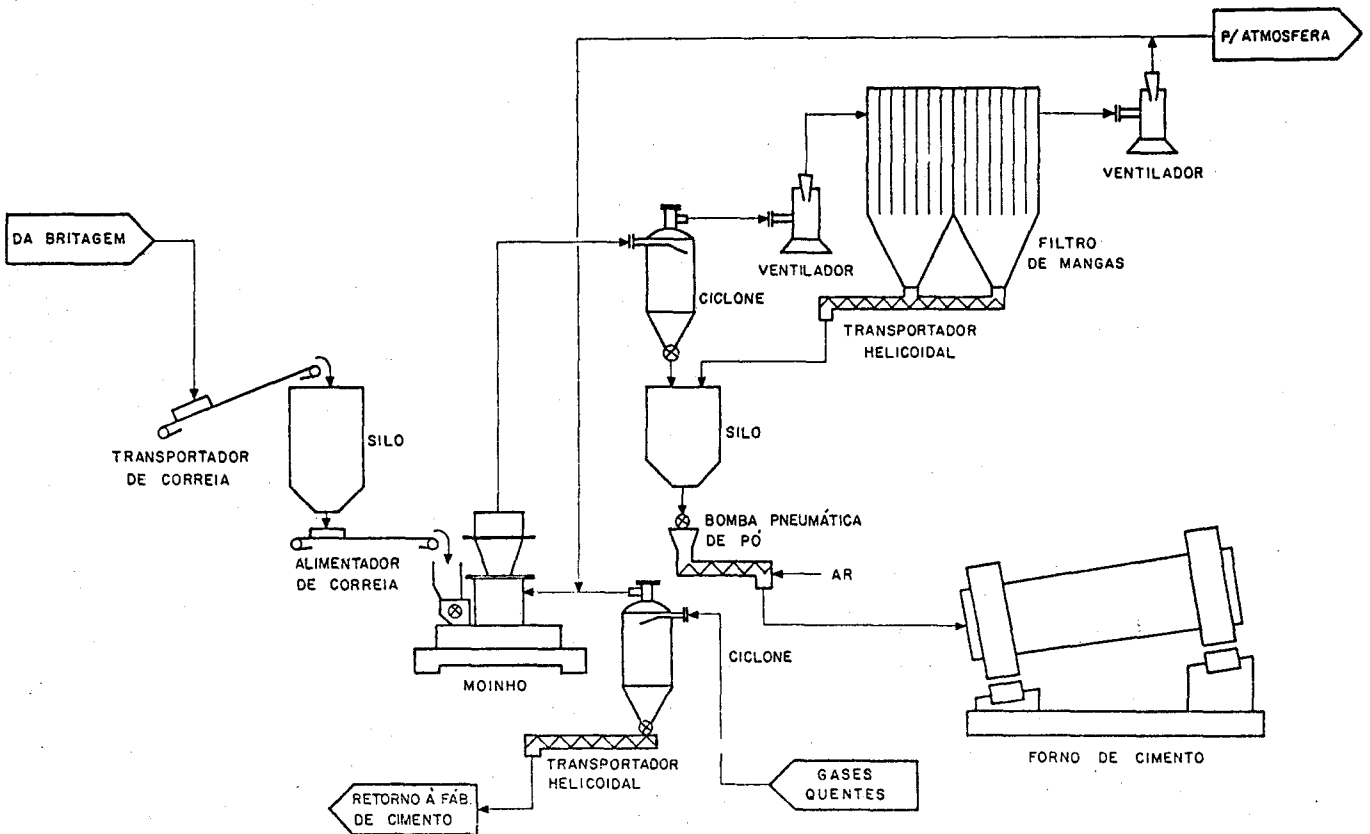
- a - baixa carga de pó no filtro;
- b - gás de recirculação limpo.

Como desvantagens, citaríamos:

- a - vazão passante pelo filtro inclui a recirculação ao moinho, o que resulta em um tamanho maior de equipamento, com conseqüente aumento no investimento.
- b - o filtro recebe somente as partículas finas, tornando-o vulnerável a incêndios e explosões.

A figura 4 apresenta o fluxograma correspondente.

FIGURA 4 - Fluxograma de processo  
Queima indireta  
Tomada de gases de recirculação após o filtro de mangas

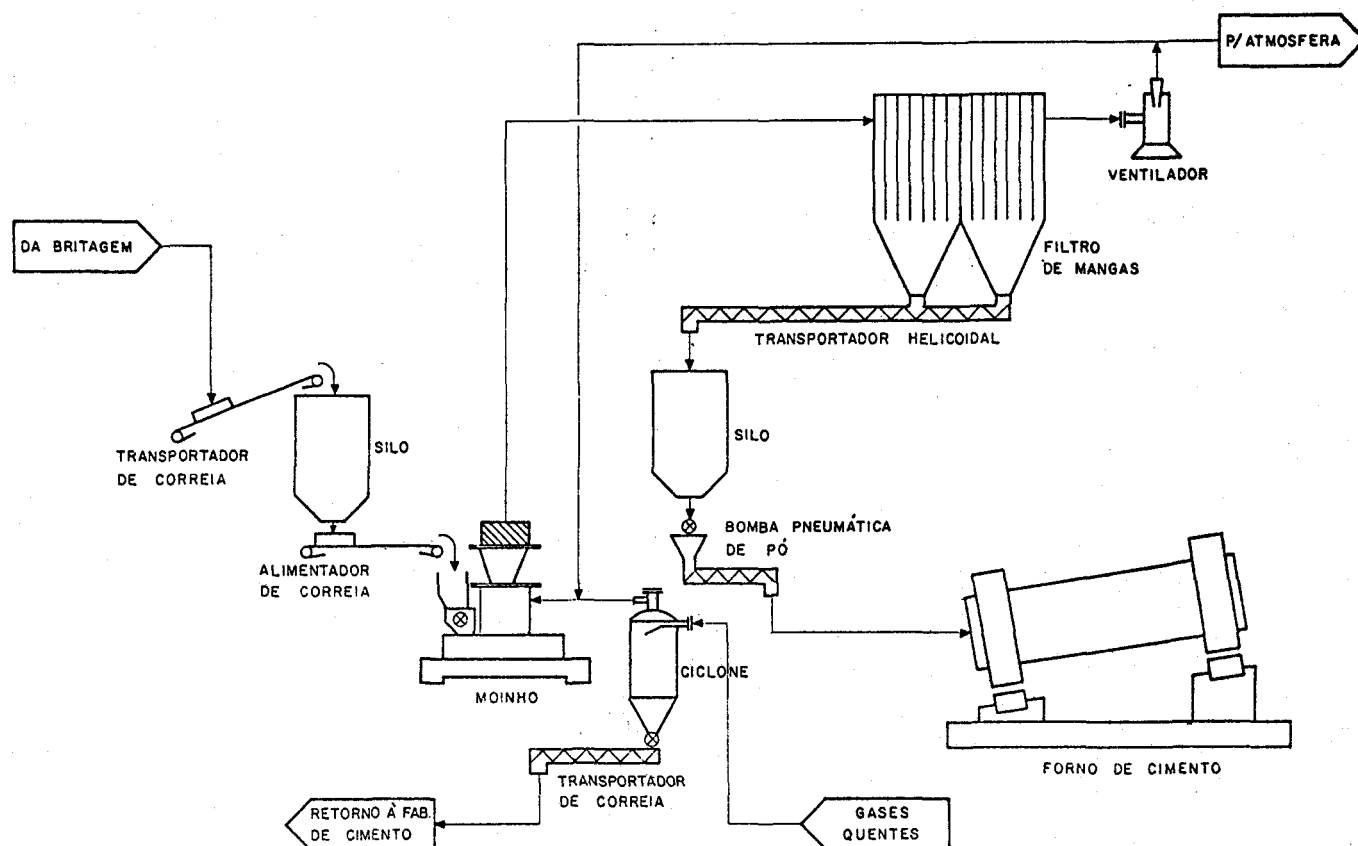


### 2.3.3. Separação gás-sólido em filtro de mangas (sem pré-separação em ciclone)

A configuração dessa alternativa, mostrada no fluxograma da figura 5, apresenta como vantagens:

- a - gás de recirculação é limpo;
- b - o diâmetro médio de partícula admitido ao filtro de mangas é maior. Isso torna a operação do filtro mais segura.

FIGURA 5 - Fluxograma de processo  
Queima indireta  
(Sem pré-separação em ciclone)



Como desvantagem, deve-se adotar uma taxa de filtração menor, o que leva a um maior tamanho de equipamento, aumentando em consequência os custos de investimento.

### 3. Critérios de projeto

As instalações de moagem de carvão a ser empregado como combustível na indústria cimenteira, utilizam processos de moagem a seco. A secagem do carvão é normalmente realizada concomitantemente à operação unitária da moagem.

O grau de finura necessário para a obtenção de um produto moído adequado, dependerá em grande parte das características do carvão. Assim, um carvão mais reativo exigirá um menor grau de moagem, enquanto carvões mais reativos são menos exigentes quanto ao nível de moagem.

A figura 6 mostra o gráfico de granulometria versus teor de voláteis do carvão, indicada para uma combustão de alta eficiência. O teor de voláteis é assim uma medida da reatividade do carvão, isto é, quanto maior o teor de voláteis, tanto maior será a facilidade de combustão do carvão.

Vamos calcular para dois tipos de carvões brasileiros a granulometria necessária para o produto moído. As análises típicas do carvão mineral sub-betuminoso e carvão vegetal, são:

Tabela I - Características químicas de carvão mineral e carvão vegetal

Tipo de Carvão	Carvão Mineral		Carvão Vegetal	
	Base Seca %	Base Isenta de cinzas %	Base Seca %	Base isenta de cinzas %
Carbono fixo	40,0	59,7	70,0	73,7
Matérias Voláteis	25,0	37,3	25,0	26,3
Cinzas	33,0	-	5,0	-
Enxofre	2,0	3,0	-	-

Fonte: PAA - Relatórios internos

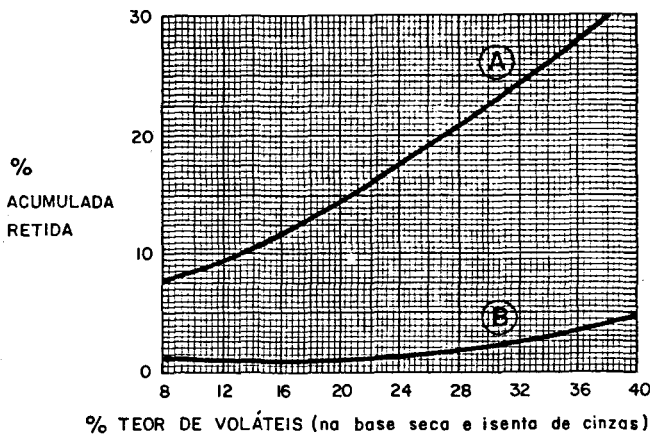
Para o carvão vegetal, a granulometria recomendada de acordo com o gráfico é:

Malha (Tyler)	% acum. retida
65	2
170	19

Para o carvão mineral considerado, a granulometria do produto moído seria:

Malha (Tyler)	% acum. retida
65	6
170	28

FIGURA 6 - Relação entre granulometria do carvão moído e o teor de voláteis



CURVA (A) - % ACUMULADA  
RETIDA NA MALHA 170 TYLER  
(0,089 mm)

CURVA (B) - % ACUMULADA  
RETIDA NA MALHA 65 TYLER

Fonte: SCHNEIDER, F. Preparação e combustão de carvão em fornos rotativos de cimento (10)

Verifica-se pelas análises calculadas na base isenta de cinzas, que não há uma diferença apreciável entre os dois tipos considerados de carvão, razão pela qual a sua mistura para queima é possível. O que não é recomendável é a moagem de misturas de carvões de características acentuadamente diferentes, tais como antracito e linhito. Como o linhito apresenta um alto teor de voláteis quando comparado com o teor do voláteis do antracito, ele será moído até um grau de finura exagerado em relação às suas necessidades, o que aumentará a periculosidade da instalação, quanto a incêndios e explosões.

Sabemos também que altos teores de inertes, ou seja, altos teores de cinza, diminuem a reatividade do carvão, e a sua influência será comentada nesse trabalho, na parte referente aos aspectos de segurança do sistema.

A classificação de carvões minerais é estabelecida pela norma DIN 51700, de acordo com a tabela II.

Tabela II - Classificação de carvões minerais

TIPO	Intervalo de Matérias Voláteis (%)
. linhito	45 - 50
. carvão de gás de chama (gás-flame coal)	33 - 40
. carvão de gás	28 - 35
. carvão gordo	18 - 30
. carvão p/ forjaria	14 - 20
. carvão magro	10 - 14
. antracito	7 - 10

### 3.1. Características de moabilidade dos carvões

O índice de moabilidade mais comumente utilizado para carvões é o chamado índice de HARDGROVE. O teste para a determinação do índice de HARDGROVE é realizado, alimentando-se o carvão bitolado na faixa de 0,6 a 1,2mm a um moinho especial, onde permanece durante um certo número de rotações. O material moído é separado em peneira quadrada de 0,075 mm de abertura. A percentagem em massa passante na peneira, D, é utilizada para calcular o índice através da seguinte expressão matemática (4):

$$H = 13 + 6,93 D$$

De acordo com R.W. Smith (4), a conversão do índice de Hardgrove para "work index" de Bond, é dada por:

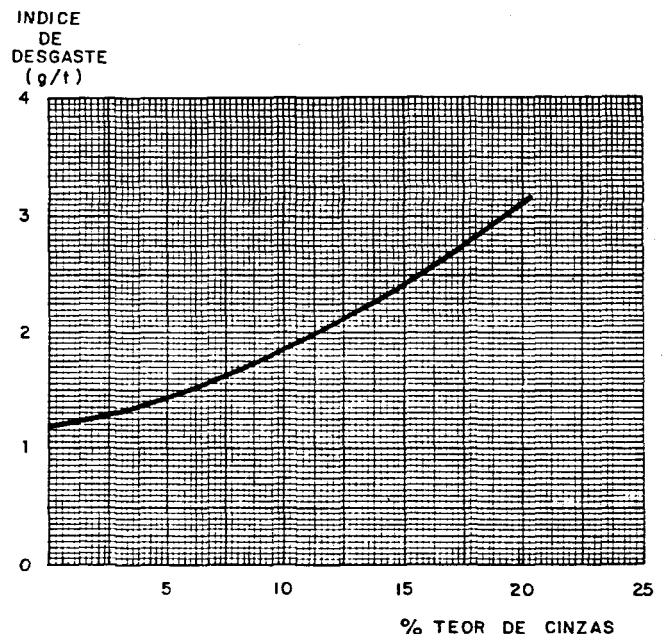
$$W.I. = \frac{480}{H^{0,91}}, \text{ em kWh/t.}$$

onde W.I. = "work index", segundo Bond. Essa correlação é somente indicativa e o seu uso não exclui a necessidade de realizar testes de laboratório para a determinação do "work index", que servirá de importante parâmetro no dimensionamento de moinhos de bolas.

As características de abrasividade de um determinado carvão não são relacionadas diretamente ao índice de Hardgrove (4).

A figura 7 mostra a correlação existente entre o índice de desgaste e o teor de cinzas do carvão mineral, conforme testes realizados em um moinho vertical de laboratório, com rolos de 100mm de diâmetro (4)

FIGURA 7 - Relação entre o índice de desgaste na moagem e o teor de cinzas do carvão



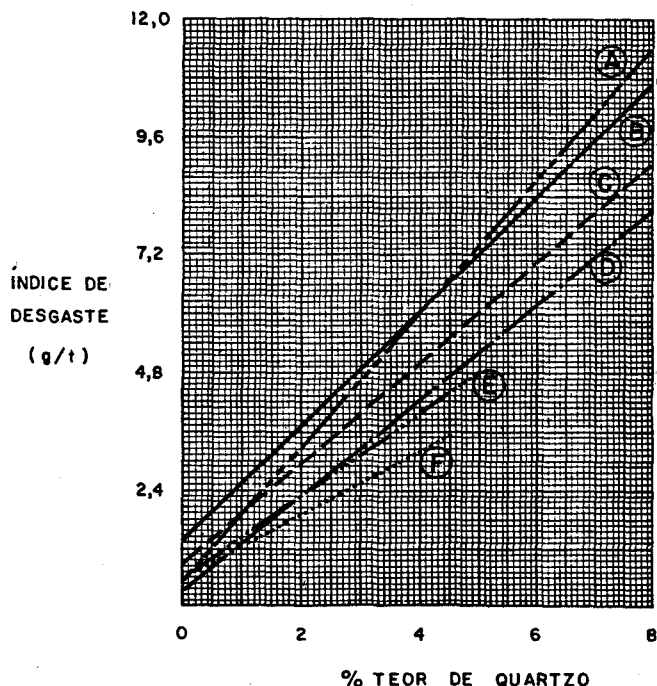
Fonte: O. HOCHDAHL Process Engineering criteria for coal preparation in the cement works (4).



O teor do mineral quartzo, bem como o tamanho das partículas de quartzo, têm uma influência marcante no índice de abrasividade do carvão. Assim é que, quanto maior o teor e quanto maiores as partículas de quartzo, tanto maior será o desgaste provocado pelo carvão mineral (4), conforme o gráfico da figura 8.

As partículas de pirita também são suscetíveis de provocar desgaste nos corpos moedores ou superfícies de desgaste dos moinhos de carvão.

FIGURA 8 - Influência do teor de quartzo e do tamanho de partículas no índice de desgaste do carvão



- (A) 300 a 212  $\mu$
- (B) 212 a 150  $\mu$
- (C) 150 a 75  $\mu$
- (D) 75 a 53  $\mu$
- (E) 53 a 38  $\mu$
- (F) < 38  $\mu$

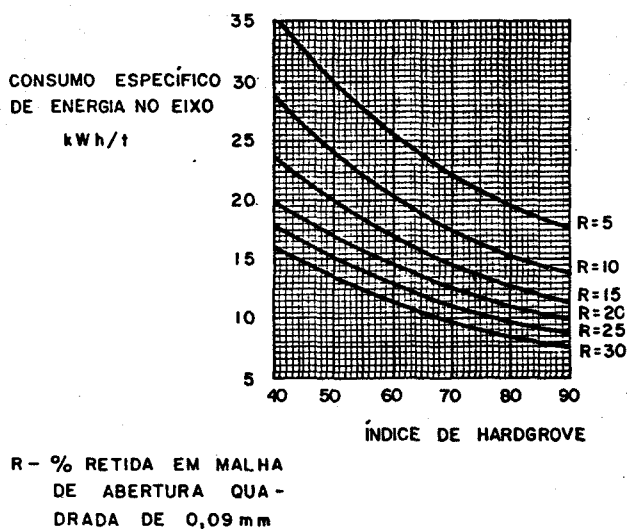
Fonte: O.HOCHDAHL Process Engineering criteria for coal preparation in the cement works (4)

### 3.2. Tipos de moinhos

A escolha do moinho mais adequado para a moagem do carvão recairá basicamente sobre dois tipos: moinho vertical ou moinho de bolas. Atualmente já se anunciam novos equipamentos, tais como, o moinho tipo torre, ainda de uso pouco disseminado.

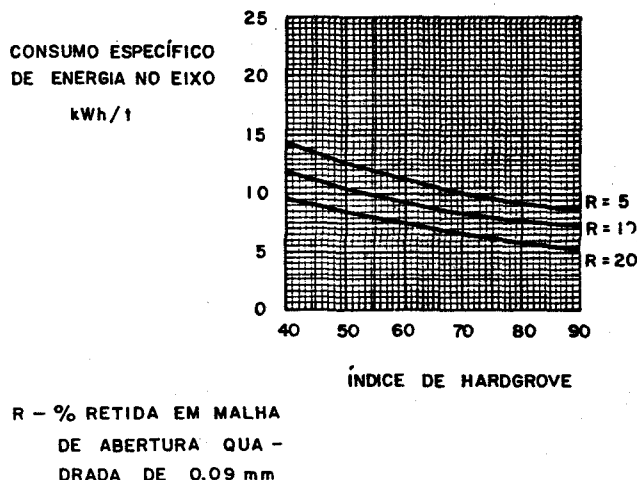
O moinho tipo vertical oferece como vantagem primordial o baixo consumo de energia, bastante inferior ao consumo de um moinho de bolas, trabalhando em condições semelhantes. Outras vantagens relevantes são o baixo custo de investimento, a distribuição granulométrica do produto em uma faixa mais estreita e sua adequação a vários tipos de carvão. Ver figuras 9 e 10, a seguir.

FIGURA 9 - Consumo de energia no eixo de moinho de bolas versus índice de hardgrove



Fonte: O.HOCHDAHL Process Engineering criteria for coal preparation in the cement works (4)

FIGURA 10 - Consumo de energia no eixo de moinho vertical versus índice de hardgrove



Fonte: Idem (4)

Além dessas, podemos citar as seguintes vantagens:

- o "top-size" (tamanho máximo) da alimentação é limitado em 50mm, enquanto para o moinho de bolas o limite do "top-size" é menor;
- o ajuste da granulometria do produto moído é bastante simples e uma vez fixada, a granulometria não é significativamente afetada por variações na taxa de alimentação ao moinho, o que contrasta com a realidade operacional do moinho de bolas, onde variações na taxa de alimentação modificam substancialmente a granulometria do produto. De um modo geral, a relação energia consumida por tonelada de produto moído é praticamente constante, dentro de um amplo intervalo de taxas de alimentação para o moinho vertical, o que explica a

constância da granulometria do produto moído, quando se varia a taxa de alimentação.

- a faixa admissível de variação da taxa de alimentação é de 20 a 100% da taxa nominal. Para o moinho de bolas, a faixa admissível é menor, reduzindo-se dessa maneira a flexibilidade operacional.
- o comportamento do controle operacional é bom, comparando-se com o moinho de bolas, onde a resposta ao controle é lenta;
- a umidade do carvão alimentado é limitado a 25% (base úmida), considerando-se secagem dentro do moinho. A umidade de alimentação ao moinho de bolas é limitada a um valor menor, mesmo com o auxílio de secagem;
- o nível de barulho do moinho vertical é bem suportável, em comparação ao alto nível de ruído provocado pelo moinho de bolas;
- o arranjo mecânico dos equipamentos para a instalação de moagem, empregando moinho vertical é mais simples do que para o caso do moinho de bolas;
- o volume ocupado pelo carvão moído dentro do moinho vertical é menor do que o volume ocupado dentro de moinho de bolas, o que traz vantagens sobre o ponto de vista de segurança contra incêndios e explosões.

As desvantagens apresentadas pelo moinho vertical são:

- periculosidade de depósito de carvão remanescente na mesa giratória, ou mesmo debaixo dela, nas ocasiões de paradas;
- formação de aglomerações de forma lamelar, na parte interna do moinho, a partir de xistos, argilas e outros minerais;
- sensibilidade a corpos estranhos, sobretudo pedaços grandes de sucata que podem provocar faiscamentos quando atritados no interior do moinho, o que pode resultar em explosões e incêndios;
- pressão negativa alta à saída do moinho, causada pela grande perda de carga que ocorre no classificador estático incorporado ao moinho;

O moinho de bolas tem como vantagens principais:

- é um equipamento mais robusto do que o moinho vertical;
- não é sensível a corpos metálicos que contaminem a alimentação;
- o período entre trocas das placas de desgaste (corpo e extremidades) é bastante maior, comparado com o período de trocas para superfícies de desgaste do moinho vertical.

Com relação ao pessoal de operação, os dois tipos de moinhos têm o mesmo nível de exigência de qualidade e quantidade. Os custos de manutenção e reposição de peças são da mesma ordem de magnitude para os dois tipos de moinhos considerados.

Como consequência, sob o ponto de vista de Engenharia de Processo e levando em conta considerações ambientais e de segurança contra incêndio e explosões, o moinho vertical é o mais adequado para a moagem do carvão.

### 3.3. Características do circuito de moagem

A circulação do carvão através do circuito de moagem é feita em meio gasoso, empregando-se, quando possível, gases inertes. O emprego de gases inertes é recomendável devido à periculosidade apresentada pelo carvão finamente dividido em presença de oxigênio, como veremos mais adiante.

O circuito deve trabalhar preferencialmente sob depressão, evitando-se dessa maneira a instalação de sistemas sofisticados e caros de selagem.

Para temperaturas à saída do moinho variando entre 60 e 90°C e infiltrações de ar de 10%, utilizam-se taxas de fluxo gasoso entre 2,6 e 2,8 Nm<sup>3</sup>/kg de carvão seco, para uma temperatura de 320°C do gás à entrada do moinho e umidade de carvão alimentado de 10%. A taxa de gás varia naturalmente em função do balanço térmico na secagem.

A velocidade de transporte adotada em projeto é 24m/s. Valores de projeto mais altos são desaconselháveis, uma vez que os desgastes nos dutos, ciclones, ventiladores etc. se tornariam inadmissíveis. Valores menores também não devem ser adotados, sob pena de chegarmos a diâmetros muito grandes e portanto anti-econômicos.

Os dutos de transporte devem ter inclinações nunca inferiores a 60°, a fim de evitar depósitos de carvão, o que tornaria insegura a operação.

O ciclone de separação sólido-gás deve ser selecionado para trabalhar com eficiências de coleta superiores a 90%. Eficiências inferiores a 90% resultarão em uma maior carga de pó no fluxo gasoso alimentando o filtro de mangas, o que não é conveniente, resultando em um maior tamanho de equipamento. É evidente que essas recomendações se aplicam para aqueles circuitos em que o ciclone pré-separador é empregado.

Os parâmetros que influenciarão o balanço de massas no ciclone são: vazão, temperatura e viscosidade dos gases, densidade real e tamanho médio de partícula.

Para o dimensionamento de ciclones, utilizamos com sucesso o computador, já que o procedimento de cálculo é bastante extenso e tedioso.

O dimensionamento do filtro de mangas é normalmente feito com dados e recomendações de fabricantes, sendo considerados os seguintes parâmetros: característica do pó, característica da fonte geradora de pó, granulometria do pó, temperatura dos gases, carga de pó nos gases.

Para uma temperatura de 90°C à saída do ciclone, a taxa de filtração recomendada é 1,5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> x min).

A utilização de filtros eletrostáticos em instalações de moagem de carvão é normalmente evitada, devido a explosões que podem ser provocadas pela ignição do carvão em contato com centelhas geradas no filtro.

O cálculo de perdas de cargas no circuito com objetivo de dimensionar os ventiladores pode ser realizado com a ajuda de tabelas como a da Joy Manufacturing Co. Consideramos um fator de projeto de 1,21 sobre o valor total calculado pela tabela.

## 4. A segurança contra incêndios e explosões

Como misturas de pós combustíveis com o ar são inflamáveis dentro de certas condições, a moagem a seco de carvão apresenta alguns complicadores que devem ser contornados, a fim de diminuir a probabilidade de ocorrência de acidentes.

Faremos a seguir uma análise do assunto.

### 4.1. Fatores que influenciam a explosividade de pós

Para que aconteça um incêndio ou uma explosão, devem coexistir três condições básicas, o chamado "triângulo do azar": a fonte de ignição, o oxigênio e o combustível.

Caso pelo menos uma das três condições não esteja presente, não há possibilidade de ocorrência do incêndio e/ou explosão.

Cada uma das condições pode afetar de uma maneira própria as características do incêndio ou explosão, como descreveremos a seguir.

### 4.2. Tamanho de partículas do carvão

Quanto menor o tamanho das partículas de carvão, maior será sua superfície específica, e portanto, tanto maior será sua inflamabilidade.

Também quanto menor o diâmetro médio das partículas, maior será a taxa de aumento de pressão com o tempo no teste de explosão, o que é uma medida da violência de explosão.

A taxa de aumento de pressão com o tempo  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\text{máx.}}$  é calculada pela derivada no ponto

de inflexão da curva de evolução da pressão com o tempo, no teste de explosão em esfera (1), conforme se pode ver pelo gráfico da figura 11.

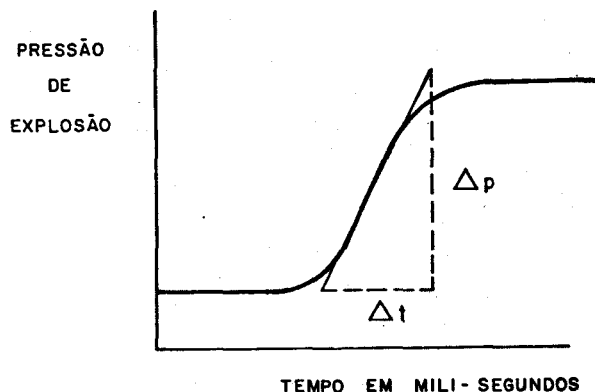
Para tamanhos decrescentes de partículas, menores serão o limite inferior de concentração de explosão, a temperatura e a energia necessários para a ignição.

Por outro lado, o decréscimo no tamanho de partículas aumenta a capacitância eletrostática de nuvens de pós, ou seja, a quantidade de carga elétrica que pode-se acumular nas partículas em suspensão.

### 4.3. Concentração de pó

Para misturas de pós no ar, há limites de concentração entre os quais há possibilidade de ocorrência de explosão. As tabelas

FIGURA 11 - Pressão de explosão versus tempo



$$\frac{\Delta p}{\Delta t} \approx \frac{dp}{dt}$$

encontradas na literatura apresentam valores referentes a pós com granulometria inferior a 0,074 mm (200 mesh Tyler).

Os seguintes parâmetros têm influência no estabelecimento do limite inferior de concentração de explosão: diâmetro das partículas, concentração de oxigênio, potência da fonte de ignição, turbulência da nuvem de pó e uniformidade da dispersão de pó.

O limite superior de concentração não é normalmente determinado devido a dificuldades experimentais. Há uma discussão quanto à existência de um limite superior bem definido.

De uma maneira geral, podemos considerar o seguinte intervalo de concentração para o carvão mineral:

- . extremo inferior - variando entre 40 e 130 g/m<sup>3</sup>
- . extremo superior - variando entre 2000 e 6000 g/m<sup>3</sup>.

### 4.4. Umidade

A umidade do pó de carvão aumenta a temperatura de ignição do carvão, uma vez que o aquecimento e vaporização da água absorvem o calor da fonte de ignição. Por outro lado, a umidade relativa do ar em contato com as partículas não tem influência no curso da explosão, uma vez que ela tenha sido iniciada. Há entretanto uma relação direta entre o teor de umidade e a energia mínima necessária para a ignição, a concentração mínima explosiva, a pressão máxima e a taxa máxima de aumento da pressão.

No entanto, a umidade não pode ser considerada como uma prevenção efetiva contra explosões, uma vez que a maior parte das fontes de energia podem fornecer mais do que suficiente para aquecer a água, evaporá-la e provocar a ignição do pó de carvão.

A fim de se evitar uma explosão, é preciso que as partículas de carvão estejam tão úmidas, que não haja a possibilidade de serem colocadas em suspensão no ar.

## 4.5. Material inerte

A presença de material inerte reduz a combustibilidade de pós porque ele absorve calor. Assim, quanto maior o teor de cinzas do carvão, menor será a sua combustibilidade.

A quantidade de inertes normalmente necessária para evitar explosões, é superior àquela tolerável como contaminação. A adição de inertes reduz a taxa de aumento de pressão e aumenta a concentração mínima de explosão.

## 4.6. Teor de oxigênio, nível de turbulência e presença de gases inflamáveis

O teor de oxigênio no ar afeta a facilidade de ignição e os níveis de pressões de explosão. Com o decréscimo da pressão parcial de oxigênio, ocorrem o aumento da energia de ignição e o decréscimo da pressão máxima de explosão. O tipo de gás inerte usado como diluente para a redução do teor de  $O_2$  também tem um efeito relacionado aparentemente à capacidade calorífica molar do gás.

Gases inertes têm um grande poder de evitar explosões de pós, porque eles diluem o teor de oxigênio a um valor tal que se torna inexequível a continuação da combustão das partículas.

A combustão ocorre na superfície das partículas de carvão. A taxa de reação, por essa razão, depende da intimidade da mistura sólido-oxigênio. A mistura em regime turbulento produz explosões mais violentas do que aquelas obtidas pela ignição de misturas em regime não-turbulento.

A adição de pequenas quantidades de gás inflamável a uma nuvem de pó, aumenta a

violência de explosão, particularmente a baixas concentrações de sólidos. As taxas de aumento de pressão resultantes são normalmente muito maiores do que se poderia prever.

## 5. Caso do projeto de uma instalação industrial

Descreveremos a seguir sucintamente o projeto da instalação de moagem de carvão da CIA. MATERIAIS SULFUROSOS S.A. MATSULFUR. A instalação já se encontra funcionando e conta com dois módulos de moagem com capacidade de 14 t/h cada, os quais atendem ao consumo das três fábricas de cimento que aquela companhia possui instaladas em Montes Claros-MG.

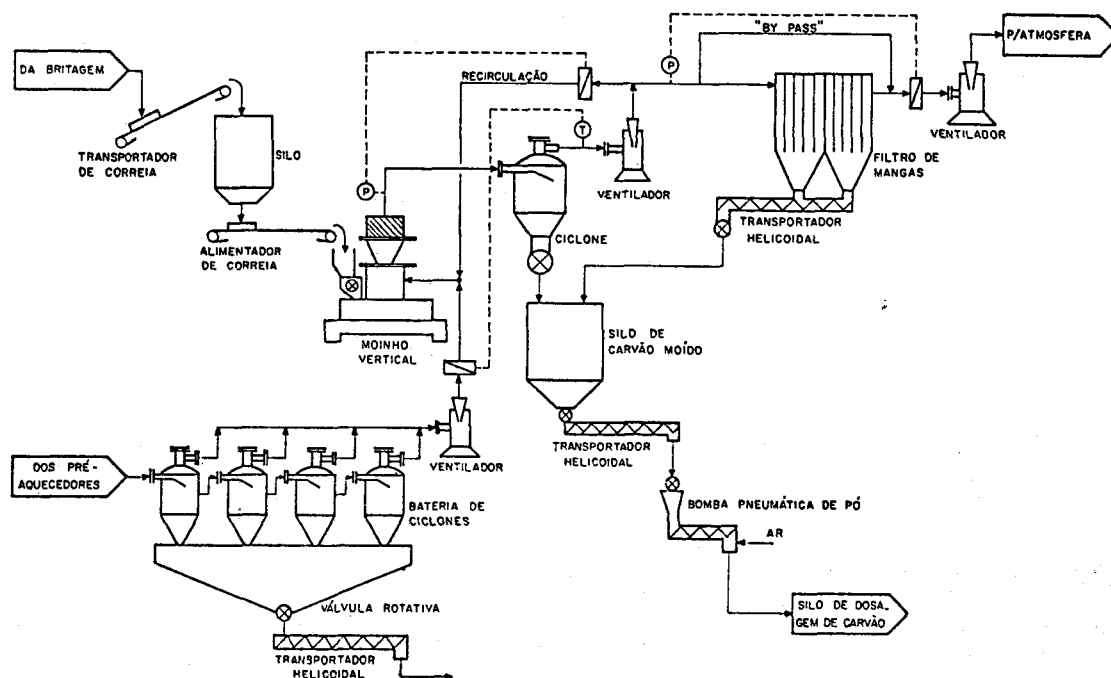
A participação da PAA no projeto contemplou as seguintes especialidades: Engenharia de Processo (concepção e básico), Engenharia de Sistemas, Mecânica, Elétrica, Instrumentação e Controle, Civil.

O processo de queima indireto foi o adotado, com recirculação ao moinho de gases tomados entre o ciclone e o filtro de mangas pertencente ao circuito de moagem. Para a secagem do carvão, utilizaram-se os gases quentes à saída dos pré-aquecedores das fábricas II e III existentes.

Em função da escolha do processo, foi necessário projetar um sistema eficiente de instrumentação e controle, de maneira a providenciar um elevado nível de segurança operacional contra incêndios e/ou explosões.

Pelo fluxograma da figura 12, podemos acompanhar a descrição feita a seguir.

FIGURA 12 - Fluxograma de processo simplificado  
Caso de uma instalação de moagem de carvão



## 5.1. Recepção do carvão

Após a britagem em moinho de martelos em circuito fechado, o carvão mineral ou vegetal, com "top-size" (tamanho máximo) de 3/8" (9,5mm), é encaminhado aos silos de alimentação dos moinhos com capacidade total de 280m<sup>3</sup> (2 x 140m<sup>3</sup>). A taxa de alimentação aos silos é 40 t/h.

Cada um dos dois silos dispõe de um filtro de mangas para despoeiramento, com vazão de ar de 3.130m<sup>3</sup>/h.

## 5.2. Circuito de moagem

O carvão é transferido de cada silo através de um alimentador de correia para o moinho vertical, tipo mesa giratória ("bowl mill"), de fabricação da CBC. Como os dois módulos de moagem são idênticos, a descrição a partir de cada silo é válida para qualquer das duas linhas.

Sobre o alimentador de correia está instalado um detetor de metais que corta o fluxo de alimentação ao moinho todas as vezes que for detetado um objeto metálico no fluxo, o qual poderia ocasionar uma centelha se viesse a entrar dentro do moinho e em consequência uma explosão e/ou um incêndio.

Dentro do moinho se processa tanto a redução do tamanho das partículas de carvão, como a eliminação da umidade, através da secagem efetuada com os gases quentes do pré-aquecedor. Tais gases apresentam um teor de O<sub>2</sub> variando entre 6 a 10%, o que os qualifica como inertes para a moagem de carvão.

Os gases são tomados após o pré-aquecedor e antes da torre de resfriamento de cada uma das fábricas II e III de cimento, apresentando uma temperatura média de 320°C e uma concentração de pó de cerca de 65g/Nm<sup>3</sup>. A vazão máxima de gases quentes é 83.940m<sup>3</sup>/h (reais).

Antes de entrarem no moinho, os gases passam por uma bateria de ciclones, onde há uma limpeza parcial do gás, retornando-se o pó ali coletado para as fábricas de cimento através de um sistema de transportadores helicoidais.

A umidade do carvão à entrada do moinho é de 15% e à saída do circuito de moagem é da ordem de 1,5 a 2,0%.

O moinho vertical dispõe de um classificador estático, onde é feita a classificação das partículas, retornando as maiores à mesa giratória para remoagem, enquanto as menores são retiradas do moinho e transportadas pneumáticamente para o ciclone e o filtro de mangas, onde se processará a separação gás-sólido.

O ciclone tem 14 pés de diâmetro e trabalha com uma eficiência de coleta de 90%. O carvão coletado é transferido para o silo de carvão moído através de uma válvula rotativa tipo "air-lock".

Os gases à saída do moinho com temperatura de 75°C são transportados por meio de um

ventilador colocado entre o ciclone e o filtro de mangas com capacidade de 49.800m<sup>3</sup>/h (reais) e pressão total de 20 polegadas WG (500 mmCA).

O filtro de mangas tem uma área total filtrante de 5.388 pés quadrados (501 m<sup>2</sup>), o que resulta em uma taxa de filtração de 1,66 m<sup>3</sup>/(min x m<sup>2</sup>).

O pó coletado no filtro de mangas é transferido para o silo de carvão moído através de um transportador helicoidal seguido de uma válvula rotativa na sua extremidade, do tipo "air-lock".

O silo de carvão é despoeirado através de um filtro de mangas com capacidade de 2.260 m<sup>3</sup>/h.

Os gases atravessam o filtro de mangas e são exauridos através de um ventilador com capacidade para 49.800 m<sup>3</sup>/h e 11 polegadas WG (280 mmCA) de pressão total.

Existe uma tubulação de "curto-circuito" ("by-pass") do filtro de mangas para situações de emergência, tais como temperaturas ou teores de CO elevados.

A operação do circuito da moagem é totalmente automática, através de três malhas principais de controle, representadas no fluxograma da figura 12.

A primeira malha controla a temperatura dos gases à saída do moinho por meio da variação na abertura da válvula gelosia dos gases quentes à entrada do moinho.

A segunda malha controla os distúrbios de pressão à saída do moinho através da variação na abertura da válvula gelosia da tubulação de recirculação de gases ao moinho.

A terceira malha controla as variações de pressão à entrada do filtro de mangas por meio da variação da abertura da válvula gelosia colocada no lado da sucção do ventilador de exaustão do filtro de mangas.

## 5.3. Medidas de segurança adotadas

Dois métodos de proteção contra incêndios e explosões foram adotados na instalação descrita: ativos e passivos.

Chamam-se métodos ativos aqueles do tipo preventivo, ou seja, procuram evitar acidentes, propiciando condições para que eles não ocorram.

Por outro lado, chamam-se métodos passivos de proteção aqueles que minimizam os efeitos em consequência de combustão do carvão já ocorrida.

### 5.3.1. Medidas ativas adotadas no projeto

- utilização de gases inertes nos processos de moagem e secagem do carvão, com teor de O<sub>2</sub> inferior a 10%;
- temperatura baixa dos gases à saída do moinho (onde a concentração de carvão, na ordem de 300 g/m<sup>3</sup>, é crítica);
- existência de detetor de metais e extrator de sucata antes do silo de carvão granulado;

- d - existência de detetor de metais antes do moinho, conjugado com o desviador de fluxo para rejeitar as peças metálicas que porventura sejam detetadas no fluxo de carvão;
- e - sistema de controle de poluição ambiental, com captação da poeira formada;
- f - chaves vigilantes do movimento dos eixos de transportadores de parafuso e válvulas, evitando-se acúmulos de pó;
- g - superfícies com inclinações adequadas, de maneira a evitar acúmulos de pó;
- h - medições de temperaturas, localizadas estrategicamente, com sinais sonoros indicando níveis perigosos de funcionamento;
- i - mangas dos filtros dotadas de fios condutores para a eliminação de cargas eletrostáticas;
- j - sistema eficiente de aterramento.

#### 5.3.2. Medidas passivas adotadas

- a - análise de CO nos gases à saída do filtro de mangas, na entrada do moinho e nos topos dos silos de carvão moído, para detetar início de combustão;
- b - medições de temperaturas nas moegas dos filtros e nos silos de carvão, para detetar sobreaquecimentos localizados, devido a chamuscamento de carvão;
- c - estrutura dos moinhos capaz de suportar explosões de até 30 bar de pressão;
- d - estrutura dos filtros de mangas de processo com resistência a pressões até 2000 mmCA;
- e - portas de alívio de explosões nas tubulações de saída dos moinhos, nos filtros de mangas de processo, nos ciclones e nos silos de carvão moído. Para o dimensionamento das portas, foi utilizada a norma americana NFPA 68 - 1978 - Guide for Explosion Venting.

### 5.4. Pré-operação

A PAA foi contratada pela MATSULFUR para fazer a pré-operação das duas linhas de moagem, nas áreas de Processo e Controle.

Os testes foram iniciados com a instalação funcionando em vazio, posteriormente com calcário e em seguida com uma mistura de 50% de carvão vegetal e 50% de carvão mineral.

Durante a fase pré-operacional com a mistura de carvões, ocorrida nos meses de julho e agosto de 1983, os seguintes dados médios foram obtidos:

- a - umidade do carvão granulado = 7,7%
- b - umidade do carvão moído = 1,8%
- c - granulometria:
  - % retida na malha 70 (0,210mm) = 0,65%
  - % retida na malha 170 (0,089mm) = 10,90%
- d - taxa de alimentação = 14,2 t/h
- e - pressão à saída do moinho = 372 mmCA
- f - pressão à entrada do filtro de mangas = 2 mmCA
- g - temperatura após o ciclone = 63°C

- h - % CO a saída do filtro de mangas = 0,08%
- i - % O<sub>2</sub> à entrada do moinho = 8,7%
- j - temperatura do carvão moído no silo = 58°C

O prazo total da colocação em funcionamento da instalação foi de 3 meses, estando as 2 unidades atualmente em regime normal de operação.

## 6. Bibliografia

- (1) BARTKNECHT, W. Explosions - course prevention protection. Berlin, springer verlag, 1981.
- (2) DUDA, WALTER H. Cement data-book. In: INTERNATIONAL Process Engineering in the Cement Industry. Berlin, Bauverlag,, 1977. 539 p.
- (3) FREDENBERG, K.G. & VON WEDEL, K. Coal grinding and drying with vertical mill and inert gas circuit ZKG, nº 11 (33. Jahrgang): 224-227, nov. 1980.
- (4) HOCHDAHL, O. Process engineering criteria for coal preparation in the cement works ZKG, 3 (35 Jahrgang): 56-60, mar. 1982.
- (5) KROGBEUMER, G. Equipment for the safe storage and handling of pulverized fuel: results of the "Solids Fuels" Working Group of the German Cement Works' Association (VDZ). ZKG, 3 (35. Jahrgang), 65-67, mar. 1982.
- (6) MARCHAL, G. La sécurité dans les installations de broyage et de stockage de combustibles solides. Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux, 5 (720), 1979.
- (7) MENSLAGE, O. Coal grinding and drying in inert gas atmosphere in a roller mill. ZKG, 3 (35. Jahrgang), 63-65, mar. 1982.
- (8) NIEMEYER, E.A. Design and construction of a 55 t/h central coal grinding and drying plant at Lägerdorf - Description of process engineering and safety arrangements. ZKG, 11 (32. Jahrgang): 227-239, nov. 1979.
- (9) PATZKE, J. Operating experience with coal grinding in a 50 t/h ball mill at the Lägerdorf cement works. ZKG, 3 (35. Jahrgang), 60-63, mar. 1982.
- (10) SCHNEIDER, F. Preparação e combustão de carvão em fornos rotativos de cimento ZKG, 7 (29. Jahrgang), jul. 1976
- (11) SCHNEIDER, L. & BLASCZYK, G. Coal grinding possibilities. ZKG, 7 (32 Jahrgang): 154-157, jul. 1979.

- (12) SCHNEIDER, L. Process engineering aspects of coal grinding/drying plants of explosion-resistant design with pressure relief. ZKG, 7 (35. Jahrgang): 155-161, jul. 1982.
- (13) TURCOTTE, S.F. Coal conversion at lafarge coppée. World Cement, jan./feb. 1983.
- (14) PROJETO MOAGEM E MANUSEIO DE CARVÃO P/ MATSULFUR - Documentação interna da PAA.