

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROJETO MECÂNICO

GERADOR DE GASES QUENTES EM LEITO FLUIDIZADO

Autor: Hong Joon Lee  
Nº USP 0210200  
Orientador: Prof. Dr. Cle-  
mente Greco

1984.

ÍNDICE

1. FLUIDIZAÇÃO

1.1. Conceitos e Características Fundamentais .....	1
1.2. Definição das Principais Variáveis do Processo .....	3

2. PRINCIPAIS FATORES DO PROJETO DE UM GERADOR DE GASES QUENTES UTILIZANDO COMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO

2.1. Noções Gerais Sobre Combustão em Leito Fluidizado .....	14
2.2. Temperatura do Leito .....	17
2.3. Velocidade de Fluidização .....	20
2.4. Distribuidor de Ar .....	22
2.5. Sistema de Alimentação de Combustíveis do Leito .....	26
2.6. Partida da Fornalha em Leito Fluidizado .....	29
2.7. Controle de Emissão de $SO_2$ e NOx .....	33

3. DIMENSIONAMENTO DO GERADOR DE GASES QUENTES EM LEITO FLUIDIZADO

3.1. Condição de Operação Nominal .....	35
3.2. Combustíveis Adotados e suas Características para Combustão em Leito Fluidizado .....	35
3.3. Balanço de Massa e Energia .....	37
3.4. Velocidade de Fluidização e Diâmetro de Partícula .....	40

3.5. Altura do Leito Fluidizado ( $L_f$ ) e Perda de Carga no Leito ( $\Delta p$ ) .....	41
3.6. Insuflador e Perda de Carga no Distribuidor .....	41
3.7. Distribuidor, Dimensões do Leito e Plenum .....	42
3.8. Isolamento e Camisa de Ar .....	43
3.9. Recirculação de Partículas Finas Através de Ciclones ..	
.....	45
3.10. Alimentação e Partida do Leito .....	48
3.11. Ventilador de Fluidização e da Camisa de Ar .....	49
3.12. Resumo das Condições e Controle de Operação do Leito .	
.....	50
<u>BIBLIOGRAFIA</u> .....	52

## SUMÁRIO

O presente trabalho juntamente com "Projeto de um Secador Rotativo para Fertilizantes" de Daniel Marcelo Rachman e "Projeto de um Sistema de Despoeiramento e Lavagem de Gases" de Giancarlo Lombardi visa ao dimensionamento de uma Unidade de Secagem de Fertilizante com uma produção horária de cem toneladas.

Os objetivos básicos deste trabalho são:

- Apresentar aspectos característicos do processo de fluidização e combustão em leito fluidizado.
- Apresentar os principais fatores que influem no projeto de uma unidade de combustão em leito fluidizado, os problemas de operação e soluções adotadas por pesquisadores e fabricantes nesta área.
- Apresentar um pré-cálculo e um projeto básico de um Geração de Gases Quentes em Leito Fluidizado utilizando combustão em leito fluidizado.

## 1. FLUIDIZAÇÃO

### 1.1. Conceito e Características Fundamentais

A fluidização é um fenômeno no qual um sistema sólido-fluido apresenta várias características de um fluido. A título de exemplo, imaginemos um cilindro vertical com um fundo poroso, contendo areia até a uma determinada altura. Força-se o ar, ou qualquer outro fluido, a passar pelo fundo poroso e consequentemente pela coluna de areia (fig. 1.1).

Inicialmente, com a vazão de ar muito pequena, observa-se uma perda de carga nessa coluna. Quando se aumenta essa vazão, essa perda de carga também é aumentada até o ponto em que essa perda é suficiente para suportar o peso da coluna de areia. Define-se esse ponto como condição de Mínima Fluidização.

Aumentando-se ainda mais o fluxo de ar, o leito se expande, porém a perda de carga permanece constante. Observa-se nessa condição, vários pontos de erupção de bolhas de ar ascendentes, ocasionando formação de ondas na superfície do leito. Verificam-se altos coeficientes de transmissão de calor e massa, propiciando ótimas condições para determinados processos químicos e, particularmente, a combustão de combustíveis sólidos.

Com o contínuo aumento da vazão, atinge-se uma situação de intenso arraste de partículas e posteriormente a condição de transporte pneumático.

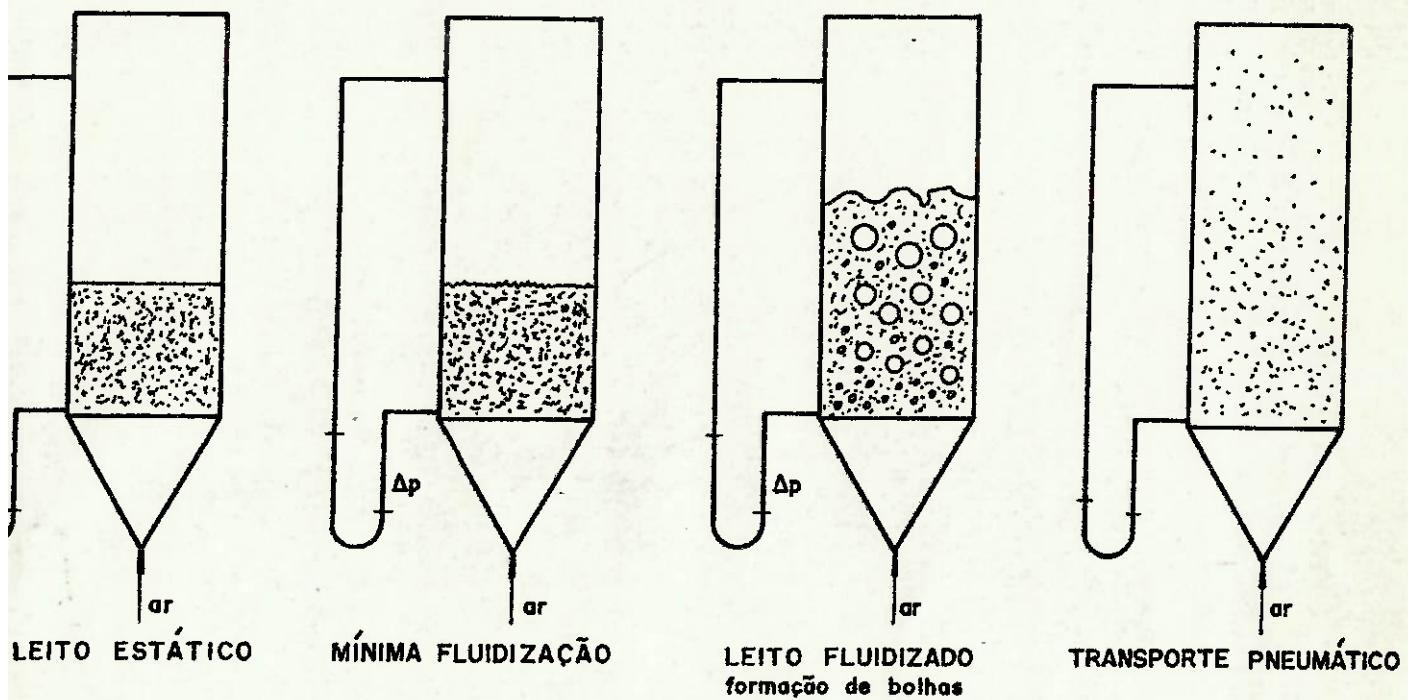


Figura 1.1. Comportamento do leito para vários fluxos de ar.

### 1.2. Definição das Principais Variáveis do Processo

Apesar do conceito de fluidização ser de fácil entendimento, os fatores que influenciam no fenômeno são em grande número, tornando a análise do processo um tanto incômodo. Não é do interesse deste trabalho fazer um desenvolvimento teórico detalhado, mas apresentar uma análise superficial desses fatores, possibilitando uma rápida estimativa das grandezas envolvidas na fluidização.

- Densidade de partícula: ( $\rho_p$ )

- Densidade do fluido ( $\rho_f$ )

- Diâmetro da partícula (Dp)

É definido como o diâmetro de uma esfera equivalente ao volume da partícula. Para se estimar o valor Dp a partir de uma dada granulometria, adota-se a seguinte expressão:

$$Dp = \frac{1}{\sum \frac{x}{d}} \quad \text{onde } x \text{ é a fração em massa}$$

- Esfericidade da partícula ( $\phi$ )

É a relação entre a área da superfície da esfera e da partícula, ambas de mesmo volume.

TABELA 1.1. - Valores de Esfericidade ( $\phi$ )

Pesquisador	Material	Esfericidade
Leva	Areia	0,6 a 0,861
	Carvão	0,625
Uchida e Fujita	Sólidos Triturados	0,63
Shirai	Areia	0,534 - 0,628
	Carvão (finos)	0,696
U.S. Bureau Of Mines	Areia de formato regular	0,86
	Areia de formato irregular	0,67

- Porosidade do leito ( $\epsilon$ )

É a relação entre o volume de gás de fluidização e o volume total do leito. A porosidade  $\epsilon_{mf}$  é definida para a condição de mínima fluidização.

TABELA 1.2. - Porosidade de mínima fluidização ( $\epsilon_{mf}$ )

		Diâmetro de partícula (mm)			
		0,10	0,20	0,30	0,40
Areia	$\phi = 0,67$	0,58	0,54	0,50	0,49
	$\phi = 0,86$	0,48	0,44	0,42	-
Carvão (finos)		0,62	0,57	0,56	-

Para areia com diâmetro médio entre 1 e 2 mm recomenda-se adotar 0,4 para porosidade de mínima fluidização.

- Velocidade de fluidização (Vf)

É a velocidade do gás de fluidização referida à secção transversal do leito. A velocidade  $V_{mf}$  é definida para a condição de mínima fluidização. A seguir são apresentadas correlações empíricas propostas por alguns autores.

1. Correlação de Leva:

- diâmetro do leito: 64 e 102 mm.
- partícula fluidizada: areia e carvão.
- diâmetro da partícula: 0,051 a 0,970 mm.
- gás de fluidização: ar e  $CO_2$ .

$$V_{mf} = \frac{D_p^{1,82} (\rho_p - \rho_f)^{0,94}}{108,6 \rho_f^{0,06} \mu^{0,88}} \quad (\text{unidades SI})$$

$$\text{para } \frac{V_{mf} D_p}{v} < 5$$

No caso de se conhecer os valores de  $\epsilon_{mf}$  e  $\phi$  a relação abaixo é recomendada:

$$V_{mf} = 0,005 \frac{D_p^2 (\rho_p - \rho_f) g}{\mu} \frac{\phi^2 \epsilon_{mf}^3}{(1-\epsilon_{mf})}$$

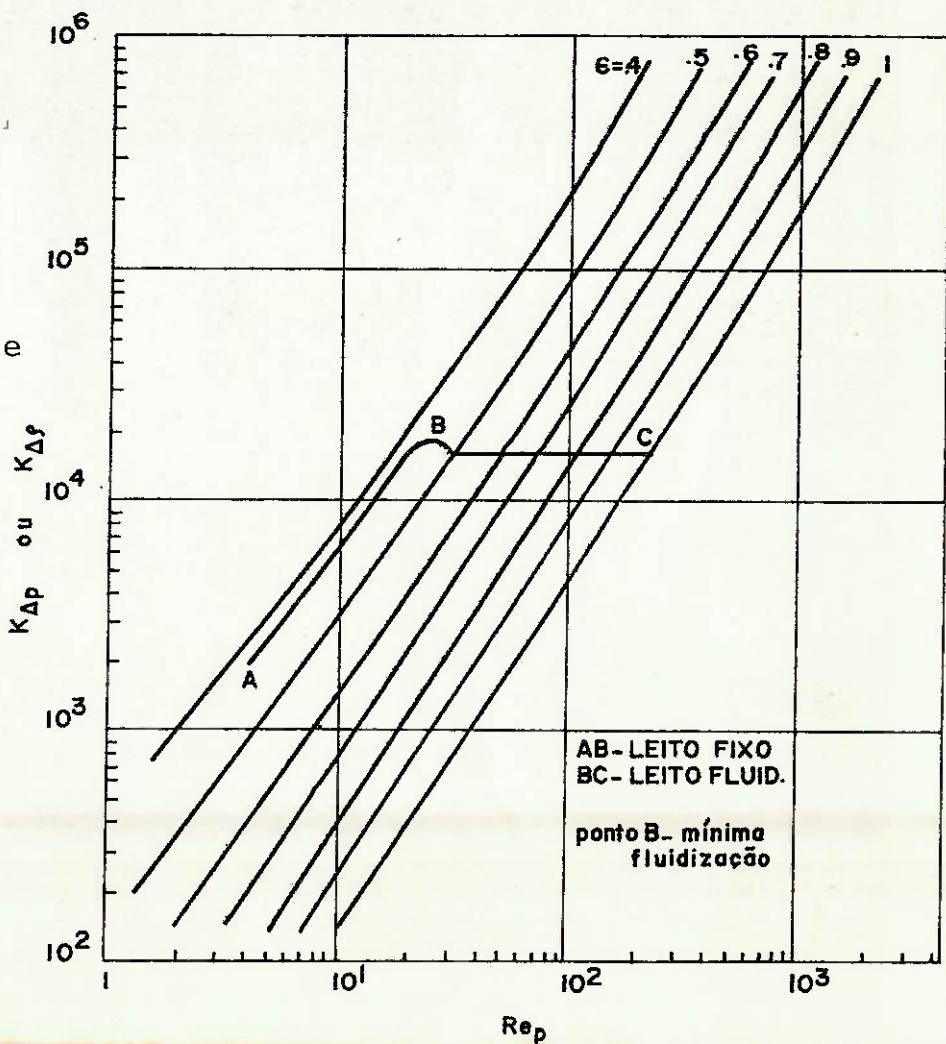
2. Correlação de Wilhelm e Kwauck:

- diâmetro do leito: 76 e 152 mm.
- partícula fluidizada: areia, rocha triturada e vidro.
- diâmetro de partículas: 0,37 a 5,2 mm.
- gás de fluidização: ar e água.

Wilhelm e Kwauck correlaciona valores de  $K\Delta p$  ou  $K\Delta\rho$  com o número de Reynolds ( $D_p V_{mf}/v$ ).

Por definição:  $K\Delta p = \frac{D_p^3 \rho_f g \Delta p}{2\mu^2 L_{mf}}$

e  $K\Delta\rho = \frac{D_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{2\mu^2}$



3. Correlação de Kunii e Levenspiel:

$$V_{mf} = \frac{D_p^2 (\rho_p - \rho_f) g}{1650 \mu} \quad \text{para } Rep < 20$$

$$V_{mf} = \sqrt{\frac{D_p (\rho_p - \rho_f) g}{24,5}} \quad \text{para } Rep > 1000$$

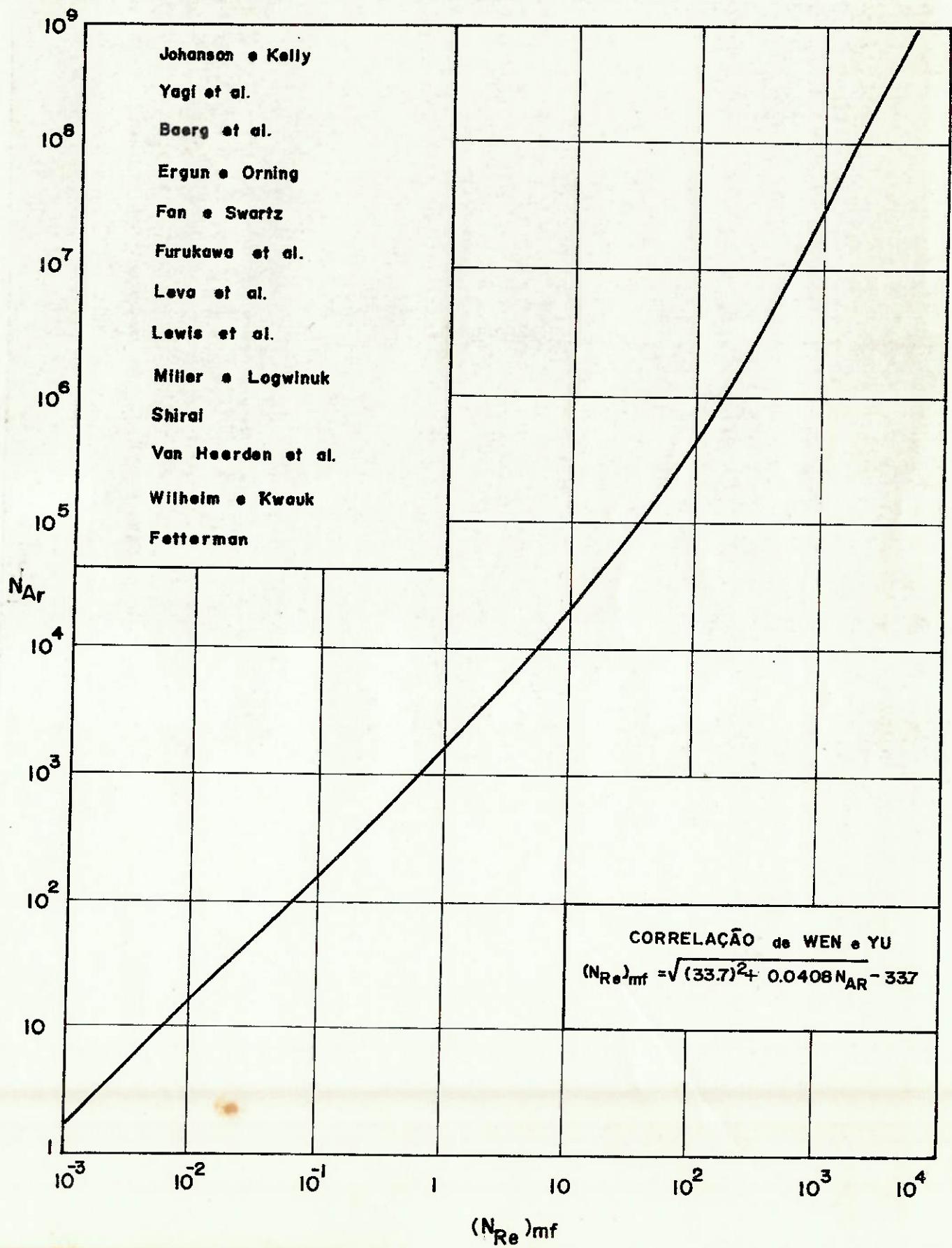
4. Correlação de Wen e Yu:

Essa correlação foi obtida com base em dados experimentais de vários pesquisadores e visa atender a uma grande faixa de condições.

$$V_{mf} = \frac{\mu}{D_p \rho_f} \left[ \sqrt{(33,7)^2 + 0,0408 \frac{D_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu^2}} - 33,7 \right]$$

A aplicação das correlações acima enunciadas restringem-se às condições experimentais para a dedução das mesmas.

Figura 1.3. Correlação de Wen e Yu



- Velocidade terminal (V<sub>t</sub>)

A vazão mínima do gás em um leito está inferiormente limitada pela velocidade de mínima fluidização. A máxima vazão está associada ao arraste de partículas do leito. Para esta condição, a força de arraste deverá ser igual à somatória das forças externas. A relação que nos fornece esta velocidade para uma partícula esférica é:

$$V_t = \sqrt{\frac{4 g D_p (\rho_p - \rho_f)}{3 \rho_f C_d}}$$

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad \text{para } Re_p < 0,4$$

$$C_d = \frac{10}{\sqrt{Re_p}} \quad \text{para } 0,4 < Re_p < 500$$

$$C_d = 0,43 \text{ para } 500 < Re_p < 200.000$$

Pettyjohn e Christiansen propôs a seguinte expressão de velocidade terminal para partículas não esféricas:

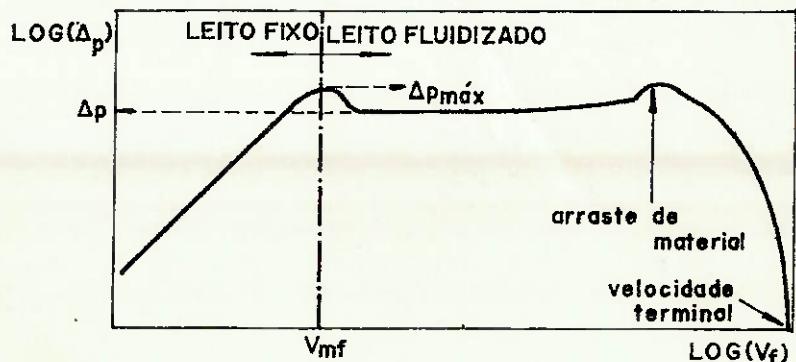
$$V_t = \frac{K (\rho_p - \rho_f) g D_p^2}{18 \mu} \quad \text{onde } K = 0,843 \log \frac{\theta}{0,065}$$

- Perda de carga no leito ( $\Delta p$ )

A condição de mínima fluidização pode ser determinada pela perda de carga no leito. Enquanto o leito estiver estático, o aumento de fluxo de gás de fluidização implica no aumento da perda de carga. A partir da condição de mínima fluidização, o aumento desse fluxo não acarreta o aumento da perda de carga (fig. 1.3.).

figura 1.4. -

Perda de carga no leito em função da velocidade de fluidização.



Na condição de mínima fluidização a perda de carga é suficiente para sustentar o leito e pode ser estimada da seguinte forma:

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_f) g$$

- Altura do leito fluidizado (L<sub>f</sub>)

É a altura da superfície do leito em relação ao distribuidor de ar. Devido ao fato da superfície do leito ser irregular e portanto de difícil definição, essa altura deve ser então tomada de um modo grosso. L<sub>mf</sub> é definido para a condição de mínima fluidização, podendo ser considerada como altura do leito estático.

O conhecimento da expansão do leito é de suma importância, já que dela depende a altura total do Gerador de gases quentes.

Uma maneira de predizer essa expansão é através da relação V<sub>f</sub>/V<sub>t</sub> proposta por Richardson e Zaki:

$$\frac{V_f}{V_t} = \epsilon^n \quad \text{onde } n = \begin{cases} 4,65 & \text{para } Re < 0,2 \\ 4,35 Re^{-0,03} & \text{para } 0,2 < Re < 1 \\ 4,45 Re^{-0,1} & \text{para } 1 < Re < 500 \\ 2,39 & \text{para } Re > 500 \end{cases}$$

Para diâmetro de leito acima de 63 mm recomenda-se usar a expressão abaixo com erro máximo de  $\pm 12\%$ .

$$\frac{L_f}{L_{mf}} = 1 + \frac{10.978 (V_f - V_{mf})^{0,738} D_p^{1,006} \rho_p^{0,376}}{V_{mf}^{0,937} \rho_g^{0,126}}$$

- Coeficiente de Transmissão de Calor (h)

A troca de calor entre o leito e a parede que a enolve é definido da seguinte forma:

$q = A_p h (T_l - T_p)$  onde

$q$  .... calor trocado entre o leito e a parede

$A_p$ .... área lateral da parede

$h$  .... coeficiente de transmissão de calor leito-parede

$T_l$ .... temperatura do leito

$T_p$ .... temperatura média da parede

Os fenômenos de convecção e condução são predominantes, podendo ser desprezada a parcela devida a radiação. O coeficiente  $h$  é basicamente dependente dos fatores abaixo relacionados:

1. Propriedades do gás de fluidização: densidade, viscosidade dinâmica, calor específico a pressão constante e condutibilidade térmica.
2. Propriedades do sólido fluidizado: densidade, esfericidade, calor específico e condutibilidade térmica.
3. Condições de operação e de mínima fluidização:  $V_f$ ,  $V_{mf}$ ,  $\epsilon$  e  $\epsilon_{mf}$ .
4. Geometria e arranjo interno dos componentes utilizados para retirada de calor.

O valor de  $h$  varia na maioria dos casos para combustão em leito fluidizado entre 250 e 500  $\text{W/m}^2 \text{ K}$ . Para unidade em escala industrial com temperatura de leito de 900 °C, velocidade de fluidização de 2,5 m/s a 3 m/s e diâmetro de material fluidizado (areia) variando entre 1 mm e 2 mm o valor de  $h$  pode ser adotado como 300  $\text{W/m}^2 \text{ K}$ .

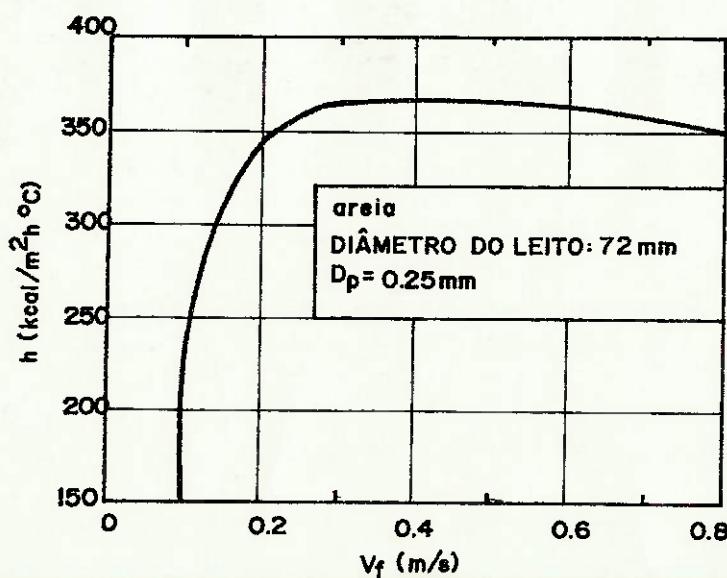
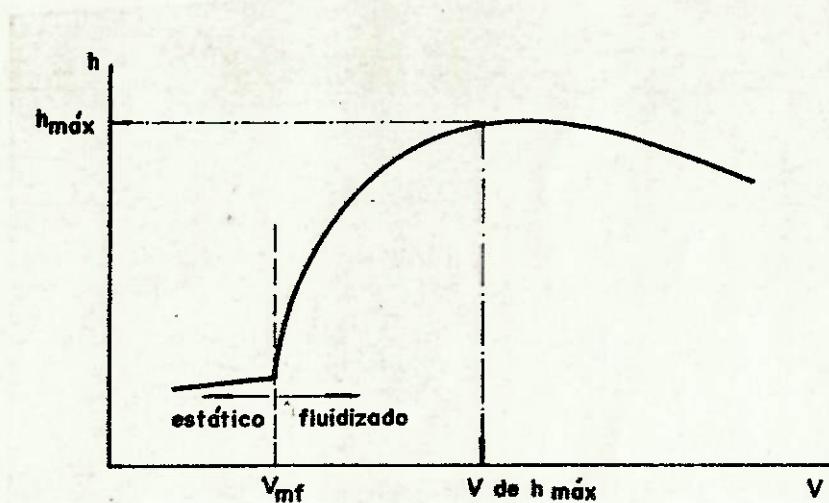
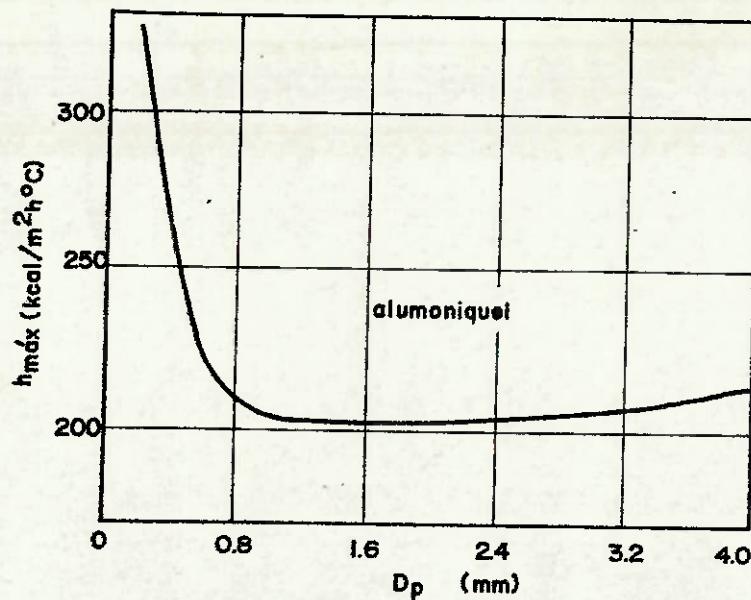


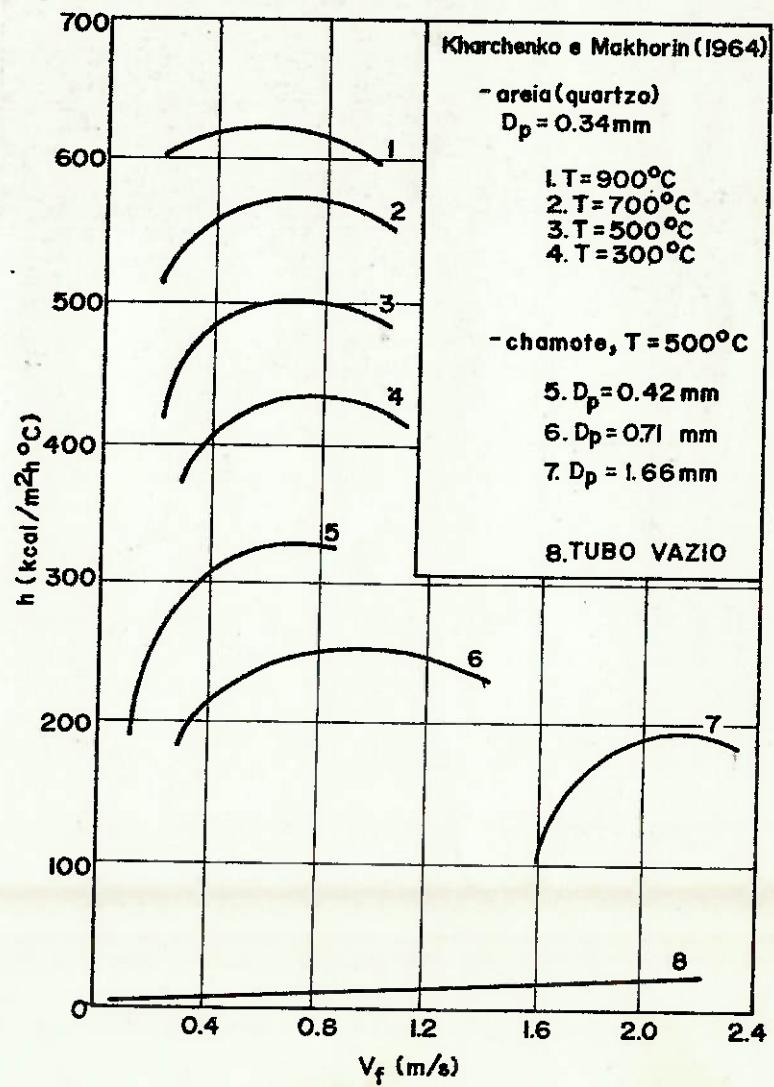
Figura 1.5. - Coeficiente de troca de calor em função de velocidade de fluidização



- 13 -

Figura 1.6. Influência do diâmetro de partícula no coeficiente de troca de calor.

Figura 1.7. Coeficiente de troca de calor em função da velocidade de fluidização, temperatura do leito e diâmetro de partícula



2. PRINCIPAIS FATORES DO PROJETO DE UM GERADOR DE GASES QUENTES UTILIZANDO COMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO

2.1. Noções Gerais Sobre Combustão em Leito Fluidizado

A combustão em leito fluidizado tem despertado grande interesse nos últimos anos, tanto em áreas de geração de vapor como produção de gases quentes para processos agrícolas e industriais. Os resultados obtidos por centros de pesquisas, além da existência de unidades em escala industrial já em operação na Europa e Estados Unidos, justificam esse interesse, encorajando novos investimentos para a pesquisa. Algumas vantagens de combustão em leito fluidizado estão abaixo relacionadas:

1. Baixa temperatura de combustão. A combustão de carvão mineral a temperatura de 800 °C pode ser executada em leito fluidizado sem instabilidade ou pontos de alta temperatura.
2. Temperatura homogênea em todo o leito. Existe uma uniformidade tanto radial como axial da temperatura do leito. Esta característica pode ser verificada em leitos de até 10m de diâmetro. Esta capacidade do leito de se manter numa condição quase isotérmica é de grande interesse para reações exotérmica com alta taxa de liberação de calor.
3. Alto coeficiente de troca de massa possibilitando unidades de combustão compactas.
4. Alto coeficiente de troca de calor possibilitando imersão de tubos para retirada de calor do leito. Esta característica é muito interessante para caldeiras. Em algumas caldeiras em leito fluidizado chega-se a retirar 50% da carga do leito apenas com os tubos imersos.

5. Possibilidade de utilização de vários combustíveis sólidos na mesma unidade, podendo operar com combustíveis de alto teor de cinzas, assim como, carvão mineral (50%) e xisto (80%).
6. Retenção de óxidos de enxofre no próprio leito com a introdução de calcário ou dolomita.
7. Alta eficiência de combustão. Essa eficiência pode atingir valores de até 99% utilizando ciclonagem para recirculação de finos de combustível arrastados do leito.
8. Facilidade de automatização do processo.
9. Baixo excesso de ar de combustão. Para caldeiras o excesso de ar está em torno de 30% para carvão mineral. Em fornalhas esse excesso de ar chega a 200% já que o ar de combustão também é utilizado para controlar a temperatura do leito.

O gerador de Gases Quentes em leito fluidizado é simplesmente uma fornalha com material inerte fluidizado e alimentação de combustível. Eventualmente a retenção e recirculação de material elutriado pode fazer parte do sistema (figura 2.1.).

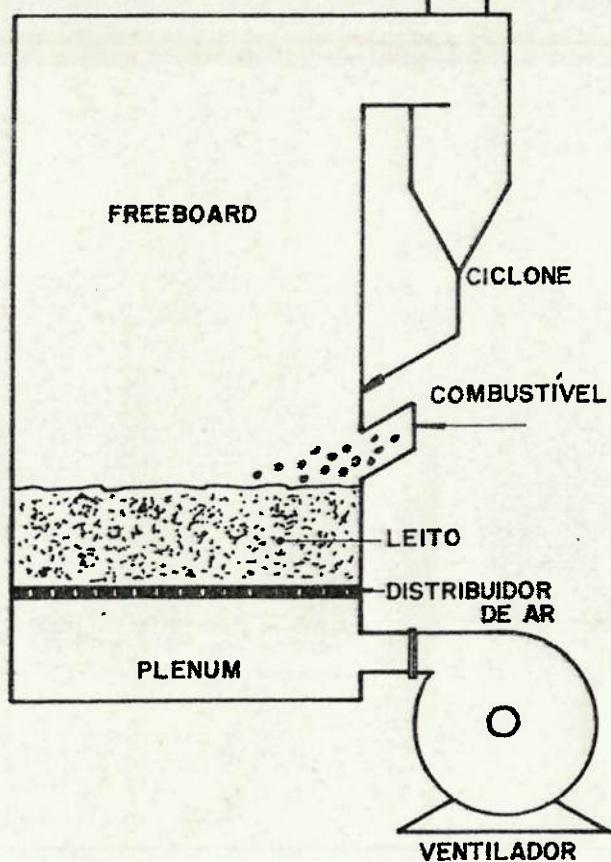


Figura 2.1. - Esquema de um gerador de gases quentes em leito fluidizado.

A combustão de partículas grandes de combustível ocorre dentro do leito fluidizado. A região acima do leito denominada Freeboard possibilita a queima de voláteis e finos de combustível elutriado. O plenum distribui o ar de fluidização para os insufladores localizados no distribuidor de ar. Algumas irregularidades na fluidização podem ser causadas devido a má distribuição de ar no plenum.

Basicamente, as fornalhas de combustão em leito fluidizado são semelhantes ao esquema da figura 2.1., variando apenas na posição e forma de alimentação de combustível e no desenho do distribuidor de ar.

As pesquisas envolvendo combustão em leito fluidizado são anteriores a 1928 quando Stratton desenvolveu uma caldeira a leito fluidizado de jorro (Spouting Bed). Stratton utilizou carvão triturado de pequeno diâmetro operando com altas temperaturas de combustão (1090 °C).

A Babcock Wosley Limited juntamente com a National Coal Board e Coal Research Establishment vêm desenvolvendo fornalhas de combustão em leito fluidizado desde 1975. Unidades de 2 MW a 15 MW estão em operação com mais de 200.000 horas de funcionamento. Essas unidades foram utilizadas para secagem de produtos agrícolas, argila e giz. Algumas unidades geravam gases quentes para processo de calcinação.

Recentemente a Coal Research Establishment conseguiu gerar gases quentes a uma temperatura de 1300 °C operando com o leito a 950 °C. O novo arranjo da fornalha (twin furnace) possibilita a utilização dessas unidades em processos que necessitam de gases a alta temperatura.

No Brasil pesquisas quanto à utilização de carvão mineral, xisto e turfa estão em andamento. A única unidade que está em operação em escala industrial é a caldeira da Jonhston Boilers. Essa caldeira trabalha com carvão mineral como combustível e utiliza calcário como material inerte para retenção de SO<sub>2</sub>.

## 2.2. Temperatura do Leito

A temperatura do leito na combustão de carvão mineral varia de 700 °C a 1000 °C. Abaixo de 700 °C encontra-se uma certa dificuldade na manutenção da estabilidade da combustão apresentando grandes flutuações na temperatura do leito.

A altas temperaturas, usualmente próximas de 1200 °C, a cinza do combustível no leito tende a amolecer, aglomerando-se e formando pedras cujos diâmetros e densidades não são propícias para a fluidização. Essas perdas acabam indo para o fundo do leito, formando uma camada acima do distribuidor de ar. Essa camada piora sensivelmente toda a fluidização do leito. Frequentemente essa formação de pedras ou clinquer é tão intensa que o leito se torna um bloco de clinquer tornando o leito totalmente estático.

A temperatura de empedramento do leito varia com a composição e granulometria da cinza e das propriedades do material no leito. A temperatura de fusão da cinza pode ser um ponto de referência para se avaliar a temperatura de empedramento, mas não deve ser encarada como tal. Amostras de cinza elutriado e cinzas maiores que permanecem no leito apresentam composições distintas e a existência de material alcalino como sulfatos de magnésio pode alterar sensivelmente o valor da temperatura de empedramento. Conhecendo-se esse valor, recomenda-se trabalhar sempre com temperaturas de leito pelo menos 100 °C menor que a temperatura de empedramento.

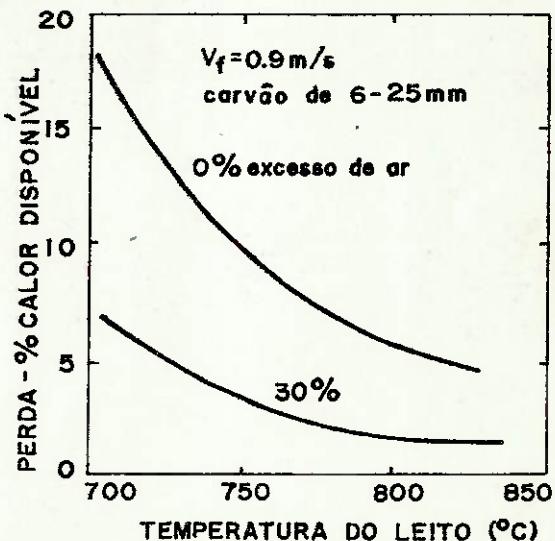
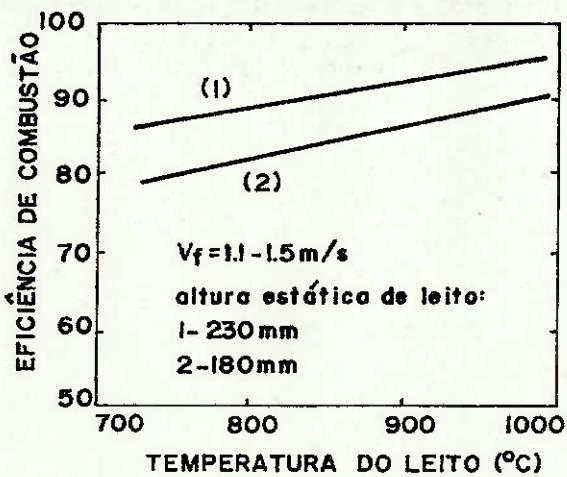
A restrição da temperatura do leito acaba por limitar esse processo convencional de combustão em leito fluidizado para a utilização dessas unidades em processos cuja temperatura de gases quentes não ultrapasse a temperatura do leito. Por esta razão, as fornalhas utilizando esse tipo de combustão em leito fluidizado têm sido de grande interesse para processo de secagem e calcinação.

A eficiência de combustão e de retenção de  $\text{SO}_2$  são também variáveis com a temperatura do leito. Procura-se trabalhar a altas temperaturas para se elevar a eficiência de combustão, diminuindo a perda de combustível por elutriação e abaixando o nível de emissão de monóxido de carbono. Essa característica é importante principalmente para combustíveis

is de alto teor de cinzas cuja eficiência de combustão é mais sensível a altura do leito e temperatura do leito.

Em contrapartida, a eficiência de retenção de  $\text{SO}_2$  diminui e a emissão de  $\text{NO}_x$  aumenta para temperaturas elevadas, além de diminuir a vida útil de refratários e outros componentes expostos a essas temperaturas.

A experiência em protótipos de vários centros de pesquisas revela que os vários fatores acima citados tem níveis aceitáveis quando a combustão ocorre entre  $800^{\circ}\text{C}$  e  $950^{\circ}\text{C}$  para carvão mineral, variando para tipos e composições de combustíveis utilizados.



### 2.3. Velocidade de Fluidização

A velocidade de fluidização, além de alterar o regime de fluidização, afeta profundamente as condições de operação do leito, assim como, eficiência de combustão e taxa de retenção de  $\text{SO}_2$ . Porém a importância fundamental na determinação da velocidade de fluidização com a qual o leito irá operar, reside no fato de que dela dependem as dimensões da secção transversal do leito e a faixa de operação (relação máximo/mínimo) do Gerador de Gases Quentes.

Definidas a temperatura de combustão no leito e as características do material a ser fluidizado, a velocidade de fluidização estará limitada pela velocidade de mínima fluidização e a velocidade terminal. Como a temperatura do leito é controlada pelo ar de combustão, a vazão de gases através da fornalha estará, portanto, limitada; definindo as condições de carga máxima e mínima.

Procura-se, na medida do possível, operar o Gerador de Gases Quentes com altas velocidades de fluidização com a finalidade de reduzir as dimensões da secção transversal da unidade. Essa escolha porém, acaba por aumentar o arraste de fixos, diminuindo a eficiência da combustão. Nessas condições é recomendável a utilização de material particulado a ser fluidizado no leito com diâmetro e densidade compatíveis com o regime de fluidização já que, para condições próximas da velocidade terminal, observa-se uma grande expansão e um aumento na turbulência (splashing) da superfície.

Pesquisas em laboratório tem utilizado partículas de diâmetro pequeno e baixas velocidades de fluidização, sendo raro os casos em que essas velocidades se aproximem dos valores utilizados em unidades de escala industrial.

As primeiras unidades de combustão em leito fluidizado testados pela National Coal Board utilizavam carvão moído com diâmetro máximo de 2mm e velocidades de fluidização próximas de 0,9 m/s. As características de fluidização eram desfavoráveis para a permanência de combustível no leito, apesar de se ter um tempo de queima baixos. Esta situação obrigou os pesquisadores a optar por uma alimentação pneumática por baixo do leito e operar a unidade com altura de fluidização mais alta. Essa condição trouxe algumas vantagens como o melhor controle de emissão de  $SO_2$  e baixa concentração de combustível no leito (aproximadamente 0,5%) , tornando mais difícil a formação de clinquer. Porém unidades de maior capacidade tinham de ser obrigatoriamente de grandes dimensões e necessitavam de vários pontos de alimentação de combustível, exigindo um estudo do lay-out da distribuição de combustível, além de um perfeito equilíbrio nessa distribuição. Chegou-se à conclusão de que velocidade de fluidização maior seria a solução para unidades de grande porte.

Unidades utilizando velocidades de fluidização de 2,5 m/s a 3 m/s e diâmetro máximo de carvão de 25mm tiveram suas dimensões reduzidas. Devido ao tempo de queima de carvão de maiores dimensões ser alto, a permanência do combustível no leito se tornou favorável e a alimentação de carvão passou a ser sobre o leito (overbed feed). A altura de fluidização foi reduzido, sendo apenas limitado pela eficiência de retenção de  $SO_2$ . O número de pontos de alimentação diminuiu já que o carvão permanecia por mais tempo no leito. Porém a concentração de carvão no leito que era de 0,5% passou para 5% (máximo 7%), aumentando a possibilidade de formação de clinquer.

Pode-se notar que a escolha de uma velocidade de fluidização é função de vários fatores e acaba modificando completamente a concepção do combustor.

Anos de teste e pesquisa sugerem velocidades de fluidização - ção entre 3 m/s e 4 m/s para combustão de carvão.

As pesquisas estão voltadas, atualmente, para estudos de unidades que operem com velocidade de fluidização da ordem de 6 m/s. Parece claro que unidades de grande capacidade devem trabalhar com velocidade de fluidização a mais alta possível e partículas inertes maiores tendo em vista a compatibilidade do leito. Os problemas causados por essa escola, como baixo rendimento de combustão e intenso arraste de finos, vêm sendo resolvidos com a recirculação do material do leito.

#### 2.4. Distribuidor de Ar

A escolha do distribuidor de ar adequado depende do processo ao qual o leito foi destinado. As funções periféricas como isolamento, retirada de cinzas e introdução de gás para processos químicos devem ser levados em conta. A figura 2.4. mostra alguns tipos de distribuidor de ar.

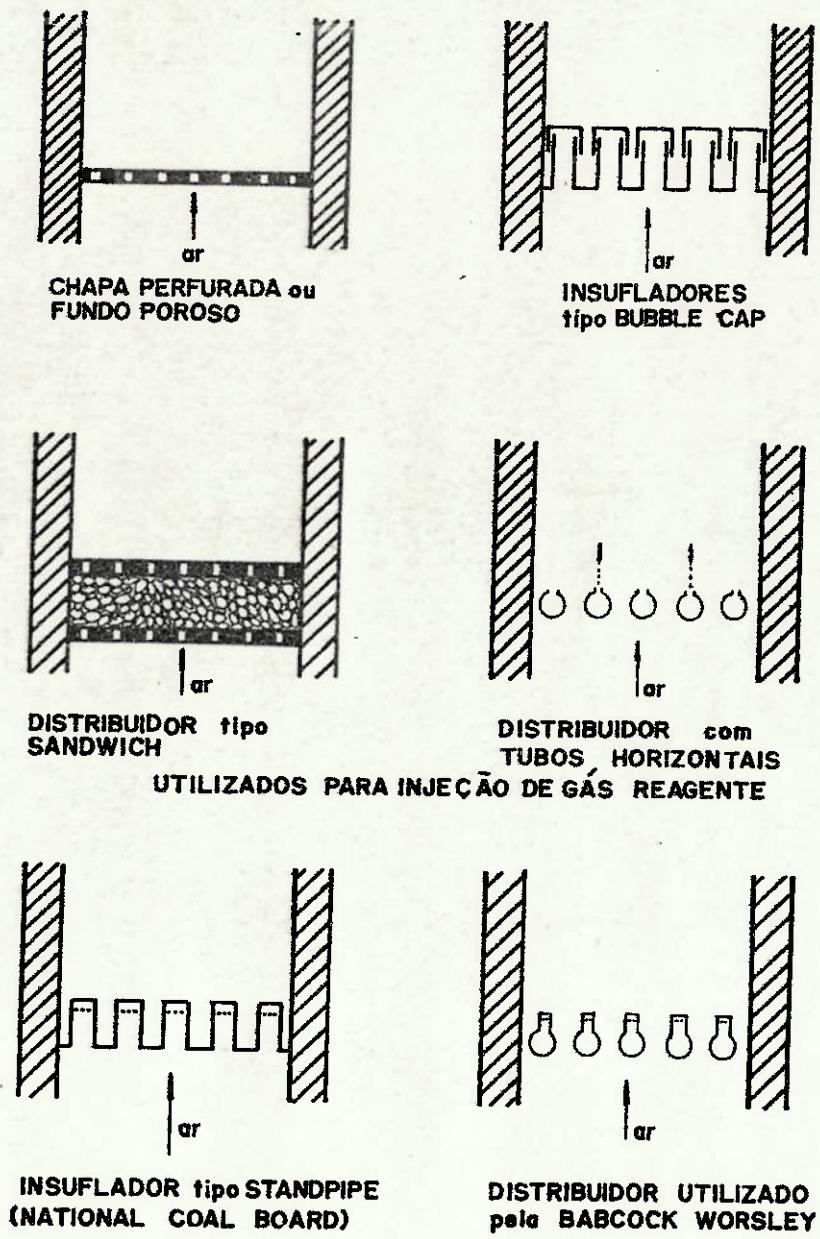


Figura 2.4. Tipos de distribuidor de ar

Os insufladores do tipo standpipe e bubble cap têm sido largamente utilizados em unidades de combustão. O insuflador do tipo standpipe desenvolvido pela NCB e PER (figura 2.5.) consiste basicamente de um tubo com uma ou mais fi -

leiras de furos radiais localizadas a uma altura  $H$  do fundo do distribuidor (chapa de sustentação). As principais razões para a sua utilização são:

1. Capacidade de evitar, de maneira eficiente, a entrada material no plenum através dos furos.
2. Capacidade de isolar a chapa de sustentação e o plenum do leito a alta temperatura.

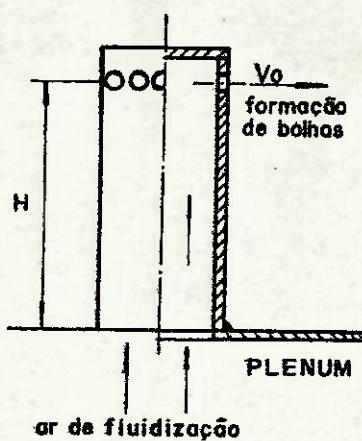


Figura 2.5. Esquema do insuflador tipo Standpipe

Se imaginarmos apenas um insuflador isolado em funcionamento, podemos observar a formação de um cone de fluidização. Na interface entre a região fluidizada e a estática existe um arraste do leito material sendo carregado para a superfície do leito e material da superfície precipitando-se para o fundo (figura 2.6.). É fácil entender que esse tipo de insuflador consegue uma alta taxa de mistura no sentido vertical do leito, enquanto que no sentido horizontal essa mistura é pobre.

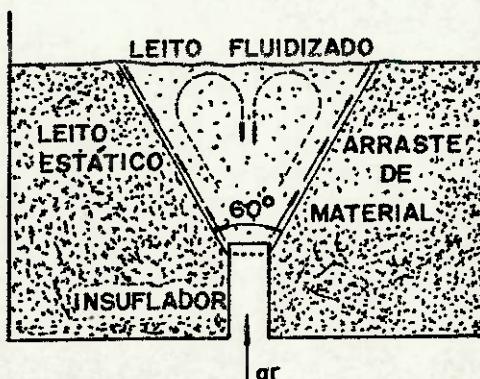


Figura 2.6. Funcionamento do insuflador-Standpipe

A perda de carga no distribuidor deve ser suficiente para garantir que o escoamento do ar seja homogêneo em todos os orifícios dos insufladores. Testes com distribuidores de baixa perda de carga mostram que a fluidização se torna instável e irregular devida à flutuação da perda de carga em pontos isolados do leito, formando assim caminhos preferenciais para o escoamento dos gases de fluidização.

Agarival, Darvis e King sugeriram que a perda de carga no distribuidor deve ser da ordem de 10% da perda de carga no leito e não inferior a 350mm de coluna de água. Testes com distribuidor tipo Standpipe apontam o valor de 15% a 20% da perda de carga no leito para se obter fluidização homogênea.

Leitos fluidizados de grandes dimensões apresentaram problemas de fluidização mesmo operando com valores de perda de carga de distribuidores que ofereciam ótima qualidade de fluidização para leitos menores. Estes problemas foram resolvidos com a modificação da entrada de ar no plenum e com o aumento da altura do plenum.

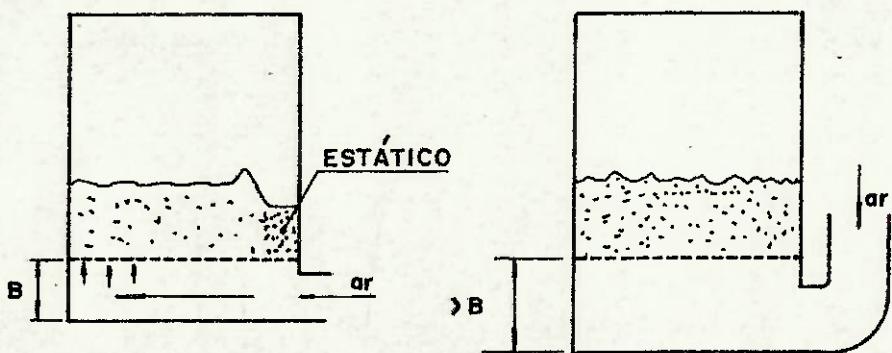


Figura 2.7. Problema de Fluidização em leitos fluidizados de grandes dimensões.

O correto dimensionamento do distribuidor é de suma importância, já que a eficiência de todos os fatores envolvidos com o Gerador de Gases Quentes dependem da qualidade de fluidização do leito.

## 2.5. Sistema de Alimentação de Combustíveis no Leito

Existem dois tipos distintos de alimentação quanto ao posicionamento do ponto de injeção do combustível em relação ao leito. O primeiro, utilizado para carvão de diâmetro menor que 6mm, é a alimentação pneumática no ponto mais baixo do leito fluidizado. O segundo, de maior interesse, é a alimentação sobre a superfície do leito utilizando combustível de diâmetro máximo igual a 25mm.

A alimentação sobre a superfície do leito pode ser feita pela lateral ou pelo topo do combustor dependendo da concepção da fornalha.

Esquemas de alimentação sobre o leito (overbed feed) estão abaixo representados:

1. Alimentação lateral com rosca transportadora

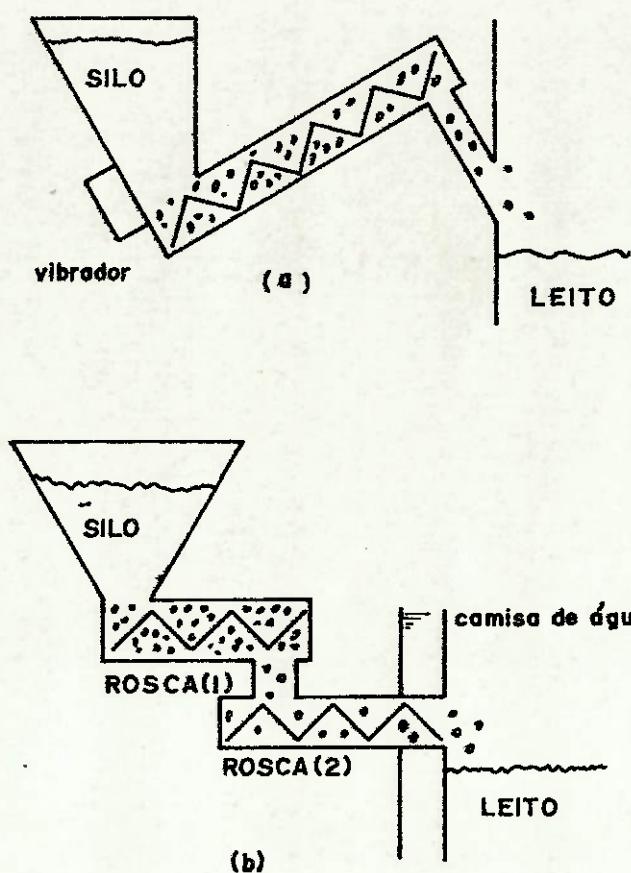


Figura 2.8. Alimentação lateral

A configuração (a) é recomendada para combustível de baixa umidade devido a problemas de entupimento na tubulação que liga a rosca transportadora ao leito. Na configuração (b) a camisa de água serve para resfriar a rosca 2 que trabalha com pouco carvão (rotação 30 rpm). A rosca 1 trabalha com rotação por volta de 10 rpm.

## 2. Alimentação pelo topo com rosca transportadora

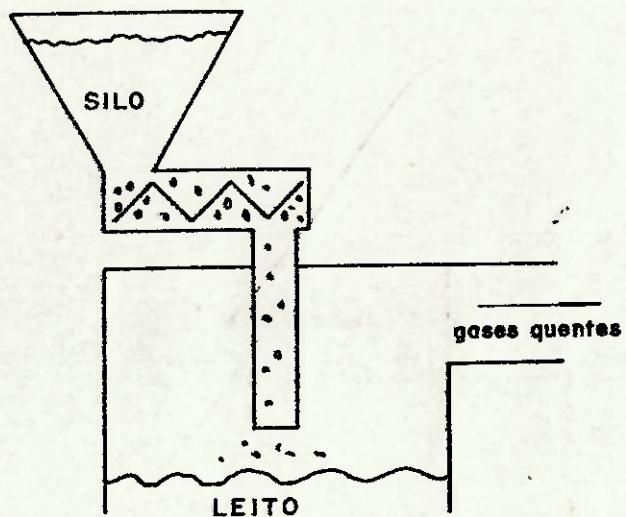
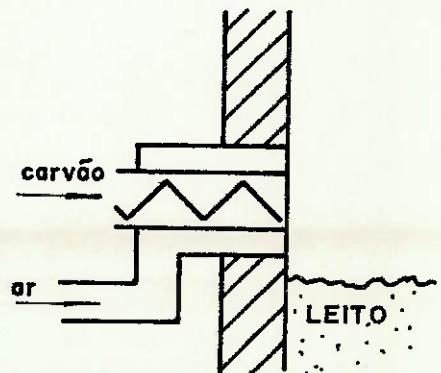


Figura 2.9. Alimentação pelo topo do leito

Quando se opera com pressões positivas no leito existe o problema do carvão na rosca ou no silo entrar em combustão devido ao fluxo de gases quentes. Neste caso é necessário um sistema que evite que esses gases entrem em contacto com o carvão tanto na rosca transportadora como no silo.

Devido à pobre distribuição do combustível no sentido horizontal, adota-se em alguns casos a alimentação lateral pneumática, injetando ar para facilitar a distribuição.

Figura 2.10. Injeção de ar na saída de combustível da rosca. O ar, além de melhorar a distribuição do combustível no leito, resfria a rosca transportadora.



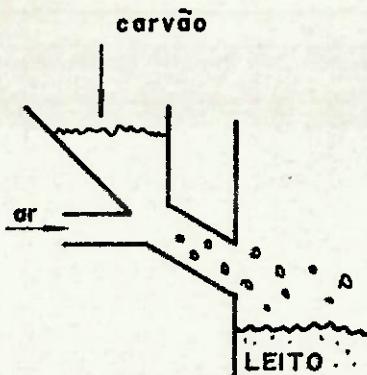


Figura 2.11. Alimentação lateral Pneumática (utilizada pela Babcock Worsley)

## 2.6. Partida da Fornalha em Leito Fluidizado

A partida do combustor (start up) em fornalhas é mais simples do que em caldeiras. As caldeiras por possuirem tubos imersos no leito que retiram calor fornecido pelo sistema de partida do leito requerem maiores queimadores, ou seja, sistema de partida de maior capacidade.

Estão exemplificados abaixo os sistemas de partida do leito de maior utilização:

### 1. Aquecimento sobre o leito

Esse processo é utilizado pela Babcock Worsley e consiste em aquecer o leito com a chama de um queimador localizado logo acima da superfície do leito fluidizado. A alimentação de carvão pode dar início quando a temperatura do leito atingir  $400^{\circ}\text{C}$ . Entre  $500^{\circ}\text{C}$  a  $600^{\circ}\text{C}$  o queimador é desligado. O posicionamento do queimador é muito importante para que a partida seja rápida.

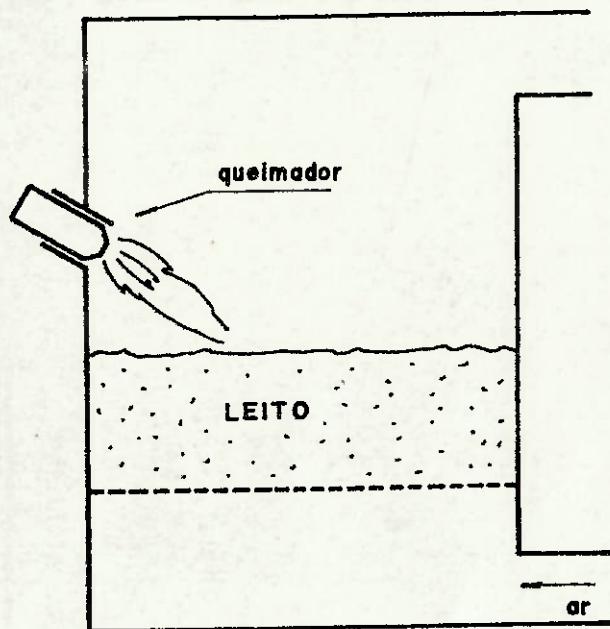
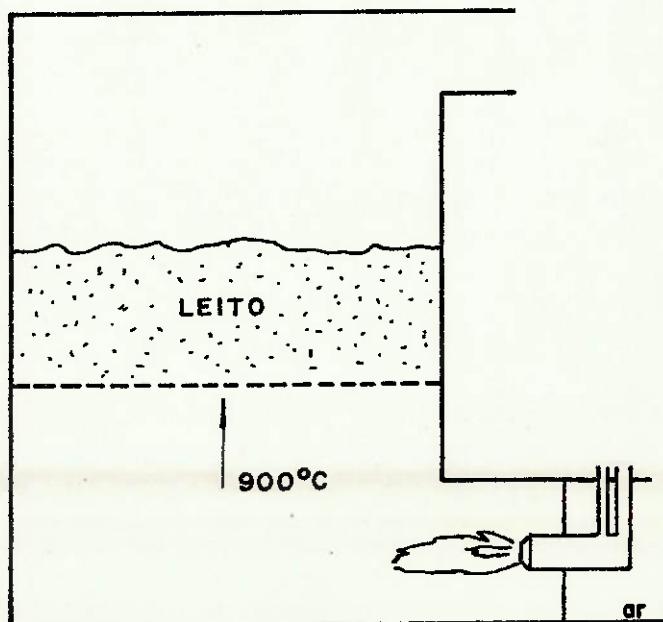


Figura 2.12. Partida de leito com aquecimento da superfície do leito fluidizado.

## 2. Aquecimento dos gases de fluidização

O sistema foi mais pesquisado pela National Coal Board e consiste em aquecer o ar de fluidização a  $900^{\circ}\text{C}$ . A alimentação de carvão tem início entre  $500^{\circ}\text{C}$  e  $550^{\circ}\text{C}$ .

Figura 2.13. Partida com aquecimento do ar de fluidização



### 3. Mistura de gás com o ar de fluidização

O gás normalmente utilizado em testes foi o metano (gás de rua). O processo consiste em misturar o ar de fluidização com o metano fazendo que a mistura entre em combusão no leito. Para isso, deve existir uma chama escoadora de um queimador localizado sobre o leito.

A frente de chama deve caminhar partindo do Freeboard e entrando no leito. Devido a perigos de combustão da mistura no plenum, a injeção de gás é feita muitas vezes acima do plenum ou dentro do próprio insuflador de ar.

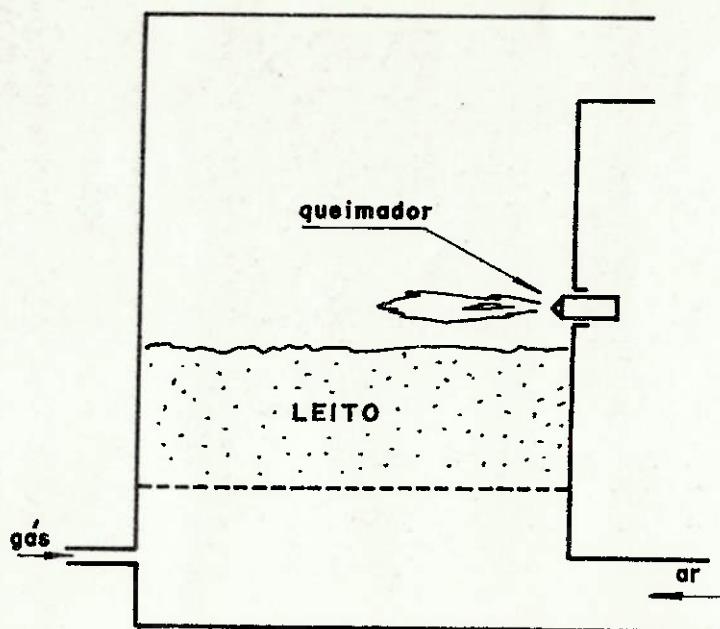


Figura 2.14. Esquema da partida com gás

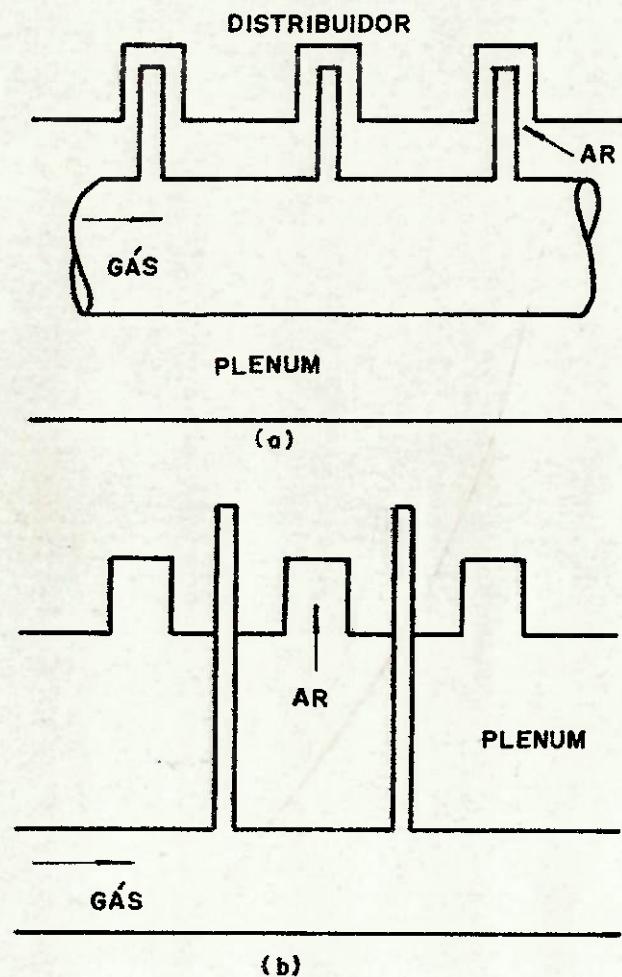


Figura 2.15. (a) injeção de gás nos insufladores  
(b) injeção de gás acima do plenum

#### 4. Mistura de ar de fluidização com óleo combustível

A idéia desse sistema de partida reside no fato de que o líquido tem maior facilidade de mistura no leito do que o gás. Além disso, unidades de leito fluidizado utilizando óleo como combustível têm sido estudados. A British Petroleum Cia. tem estudado insufladores especiais para esse tipo de partida.

O óleo combustível em forma de gotículas é fluidizado no leito e entra em combustão através de uma chama es-crvadora. O óleo diesel é o combustível que melhor se adapta a esse tipo de partida. Não é necessário a atomização do óleo. Forma-se um filme de óleo na parede do insuflador e o ar de fluidização arrasta o óleo até os furos e as gotas de óleo são fluidizadas.

Segundo estudos da British Petroleum, o número de pontos de injeção ótimo por metro quadrado deve ser 8, porém experiências com 3 pontos por metro quadrado têm mostrado resultados satisfatórios.

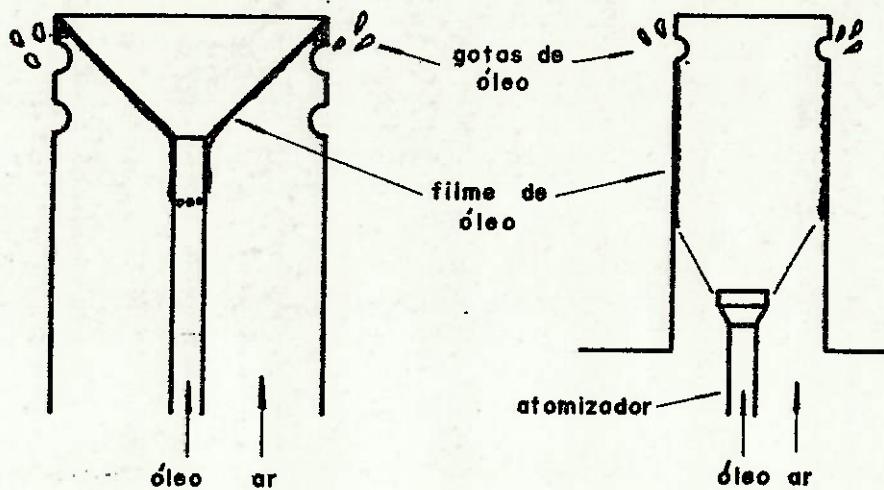


Figura 2.16. Insuflamento de óleo e ar de fluidização

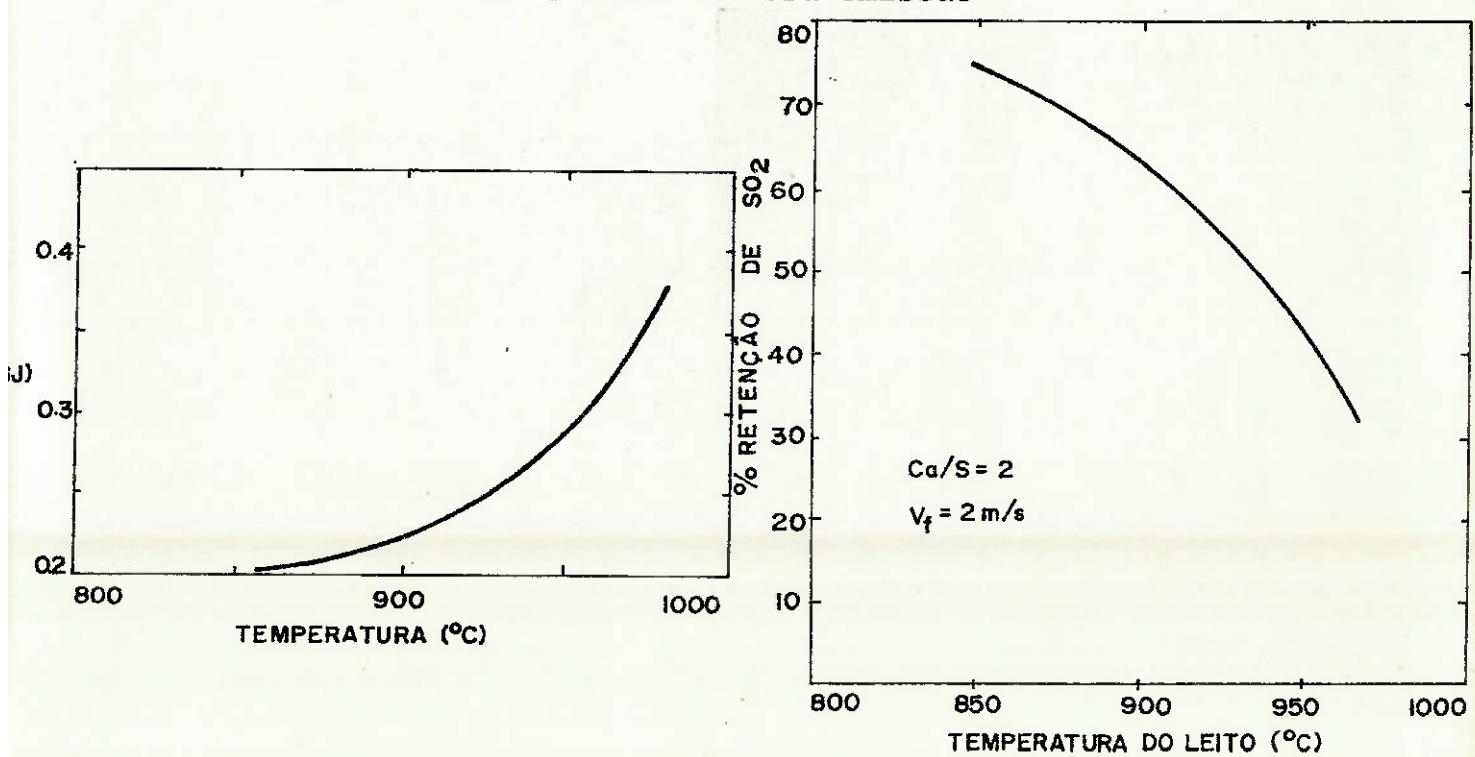
## 2.7. Controle de emissão de $\text{SO}_2$ e $\text{NO}_x$

Os fatores mais importantes na retenção de  $\text{SO}_2$  em combustíveis de leito fluidizado são: temperatura de operação do leito, razão Ca/s e a velocidade de fluidização. Outros aspectos como altura de leito, tamanho de partícula e excesso de ar não tem influência significativa na eficiência de retenção de  $\text{SO}_2$ .

A faixa de temperatura ideal do leito vizando maximizar a eficiência de retenção de  $\text{SO}_2$  está entre 760 °C e 870 °C. A razão da baixa eficiência de retenção a alta temperatura não é completamente entendido. Dados experimentais indicam que a eficiência de retenção de  $\text{SO}_2$  aumenta com o aumento da vazão Ca/s e diminui com o aumento da velocidade de fluidização.

Operando a unidade de combustão com velocidades de fluidização entre 0,9 m/s a 1,2 m/s e razão Ca/S igual a 2 obtem-se eficiências da ordem de 80%. Para se conseguir a mesma eficiência com velocidades de 2,5 m/s a 4,0 m/s foi necessário utilizar uma razão de Ca/s igual a 4. A recirculação de finos com a instalação de ciclones tem melhorado as características de retenção de  $\text{SO}_2$ . Unidades utilizando ciclones, Ca/s de 1,5 e velocidade de 3 m/s obtiveram eficiência de até 80%. A dolomita apresentou ser um material de maior capacidade de retenção de  $\text{SO}_2$  do que a perda de calcário.

A emissão de NOx apresenta-se normalmente abaixo da condição de emissão estabelecida pela EPA Standard (0,3 kg/GJ) a temperatura abaixo de 900 °C. A presença de calcário no leito (CaO e CaSO<sub>4</sub>) reduzem essa emissão



### 3. DIMENSIONAMENTO DO GERADOR DE GASES QUENTES EM LEITO FLUIDIZADO

#### 3.1. Condição de Operação Nominal

O gerador de gases quentes será utilizado na Unidade de Secagem de Fertilizantes. Essa unidade tem uma produção máxima de 100 toneladas por hora de fertilizante do tipo super fosfato e uma taxa de reciclo de 1:2. O produto sai do Granulador com a umidade de 10% (base úmida) e deverá sair do secador com 5% (base úmida). Para tanto, serão necessários uma vazão de 130.000 kg/hora de gases quentes a uma temperatura de 450 °C à entrada do secador rotativo.

Para atender às condições acima, foram adotadas as seguintes características do Gerador de Gases Quentes.

- leito vertical.
- sistema de ciclonagem acoplada à unidade de geração de gases quentes.
- relação máximo/mínimo: 1/2,5.
- combustível: 1. carvão mineral  
2. lenha.
- capacidade: 20 MW.

#### 3.2. Combustíveis Adotados e suas Características para COMbus - tão em Leito Fluidizado

##### 1. Carvão Mineral (CE-4500)

- origem: Mina de Tubarão (SC)

- poder calorífico superior: 4.500 kcal/kg

- umidade: 10% base seca (máxima)

- Composição Elementar

carbono: 46%

hidrogênio: 3%

nitrogênio: 1%

enxofre: 3%

cinzas: 47%

- Estequiométrica

• massa de ar seco: 6,42 kg ar/kg carvão

• massa de gases secos: 6,68 kg gás/kg carvão

• massa de água gerada na combustão: 0,27 kh  $H_2O$ /kg carvão

O carvão mineral brasileiro, em geral, apresenta um alto teor de cinzas, necessitando assim de um sistema eficiente para a sua retirada do leito. Pesquisas com carvão de Santa Catarina mostram que as cinzas se quebram em partículas menores, não interferindo na qualidade de fluidização. Deve-se controlar a temperatura do leito, já que existe uma quantidade considerável de cinzas que poderão formar clinquer.

2. Lenha (eucalipto)

- poder calorífico superior: 4.300 kcal/kg

- umidade admitida no projeto: 25% base úmida

- Composição Elementar

carbono: 50,45%

hidrogênio: 5,95%

nitrogênio: 0,40%

enxofre: 0,06%

oxigênio: 43,00%

cinzas: 0,14%

- Estequiometria

- massa de ar seco: 5,97 kg ar/kg lenha
- massa de gases secos: 6.44 kg gás/kg lenha
- massa de água gerada na combustão: 0,54 kg  $H_2O$ /kg lenha

Para o aproveitamento da lenha no leito é necessário que ela seja picada em tamanho adequado. A sua utilização como combustível em leito fluidizado não foi bem pesquisada, porém sabemos de antemão que o problema de formação de cinquer deve ser menor e que a eficiência da combustão será maior devido a grande quantidade de voláteis.

A utilização de carvão vegetal e turfa também é possível. O gerador de gases quentes em leito fluidizado poderá, portanto, trabalhar com vários combustíveis.

3.3. Balanço de Massa e Energia

Para se efetuar os balanços de massa e energia adotou-se os seguintes valores:

- Calor específico a pressão constante

1. ar seco:  $C_p = 6,571 + 1,06 \times 10^{-3}T$

2. água:  $C_p = 8,22 + 1,5 \times 10^{-4}T + 1,34 \times 10^{-6}T^2$

onde  $(C_p)$  = kcal/kg mol

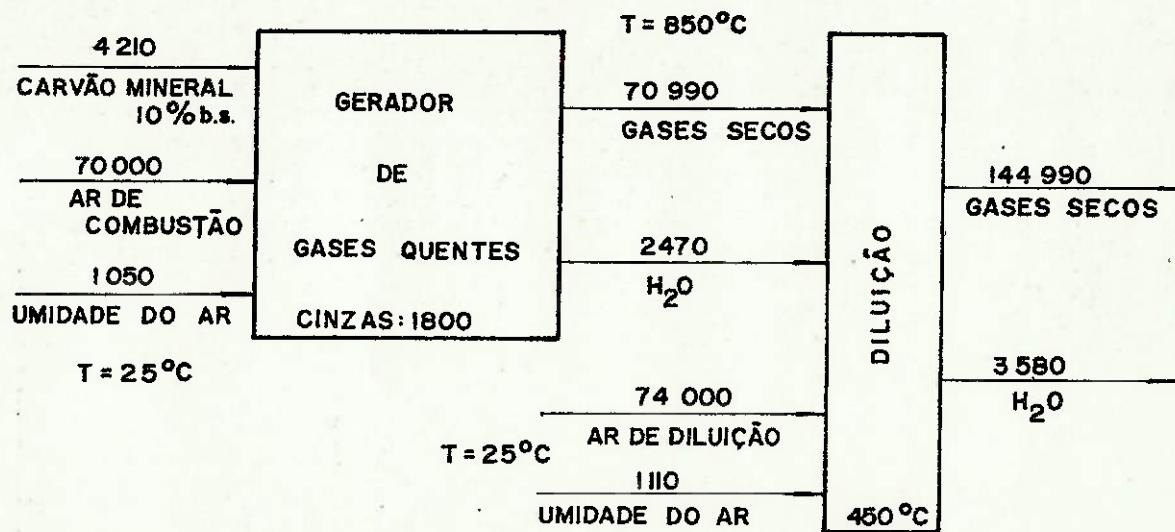
$(T)$  = Kelvin

- entalpia de vaporização da água: 583,2 kcal/kg

- umidade do ar ambiente: 15 g/kg ar seco

### 1. Carvão Mineral

- balanço de massa



Fluxo de massa em kg/hora

Umidade absoluta dos gases na entrada do secador:

25  $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$  ar seco

- balanço de energia

17 222 000	GERADOR DE GASES QUENTES	14 855 000
CARVÃO MINERAL		1 891 000
		$H_2O$
		446 000
		CINZAS
		30 000
		PERDAS

Valores em kcal/hora

2. Lenha

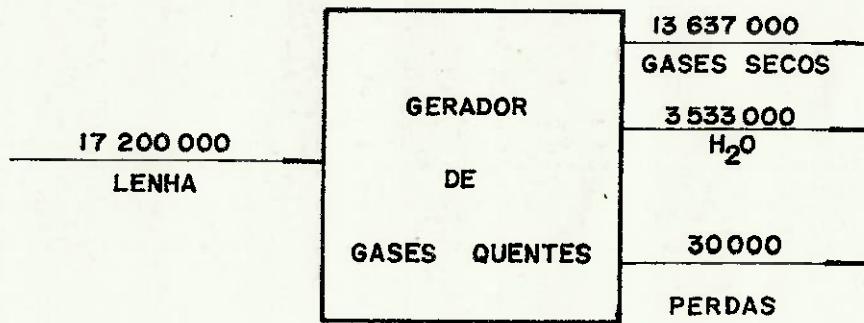
- balanço de massa

5 000	GERADOR DE GASES QUENTES $850^{\circ}C$	65 218
LENHA 25% b.u.		GASES SECOS
63 360		4 092
AR DE COMBUSTÃO		$H_2O$
950		71 500
UMIDADE DO AR		AR DE DILUIÇÃO
$T = 25^{\circ}C$		1 072
		UMIDADE DO AR
		$450^{\circ}C$
		5 164
		$H_2O$
		136 718
		GASES SECOS

Fluxo de massa em kg/hora

Umidade absoluta na entrada do secador: 38 g  $H_2O$ /kg ar seco

- balanço de energia



Valores em kcal/hora

### 3.4. Velocidade de Fluidização e Diâmetro de Partícula

Como foi discutido anteriormente a velocidade de fluidização determina as dimensões do leito e a relação máximo/mínimo da unidade de combustão. Verificou-se na prática que velocidade entre 3 m/s e 4 m/s são adequadas para combustores em escala industrial. Adotou-se então a velocidade de fluidização de 3,5 m/s na condição máxima (20 MW). O material inerte do leito será areia e calcário (massa específica igual a  $2000 \text{ kg/m}^3$ ). Esta escolha implica na determinação dos seguintes valores:

- Velocidade de mínima fluidização: 1,2 m/s
- Velocidade de fluidização na menor carga do leito (8 MW): 1,4 m/s
- Expansão do leito ( $L_f/L_{mf}$ ): 1,8
- Área da secção transversal do leito (vazão máxima de  $245000 \text{ m}^3/\text{hora}$ ):  $19,4 \text{ m}^2$

### 3.5. Altura do Leito Fluidizado (L<sub>f</sub>) e Perda de Carga no Leito ( $\Delta p$ )

A perda de carga total no Gerador de Gases Quentes depende principalmente da perda de carga no leito. Para minimizar a potência requerida no ventilador deve-se reduzir a perda de carga do sistema trabalhando com o leito raso. Porém o leito deve ter altura suficiente para que a concentração de combustível no leito não seja elevada. Adotou-se a altura estática de leito de 450 mm, determinando os seguintes valores:

- Altura de leito fluidizado: 810 mm
- Perda de carga de leito ( $\epsilon=0,4$ ): 540 mm.c.a.

### 3.6. Insuflador e Perda de Carga no Distribuidor

Devido as qualidades já apresentadas, adotou-se o distribuidor com insufladores do tipo standpipe com as seguintes características:

- Tubo  $\varnothing 25$ , ABNT-P-EB-334-Série 40, Classe N
- Diâmetro externo: 33,4 mm
- Diâmetro interno: 26,64 mm
- 18 furos de 5 mm; 3 fileiras de 6 furos

Com uma vazão de ar de fluidização de  $61500 \text{ m}^3/\text{hora}$  e um total de 1568 insufladores tem-se:

- Velocidade no insuflador: 20 m/s
- Velocidade no furo: 31 m/s
- Perda de carga no distribuidor: 170 mm.c.a. (31% da perda de carga no leito)

Para isolar a placa de sustentação do leito adotou-se uma altura de isolamento (distância da primeira fileira de furos à placa de sustentação) de 80 mm.

### 3.7. Distribuidor, Dimensões do Leito e Plenum

Com dimensões de leito de 6360mm x 3060mm tem-se um posicionamento uniforme dos insufladores no distribuidor e a garantia de que a velocidade de fluidização será 3,5 m/s. Tem-se então 28 fileiras (espaçadas de 110mm) de 56 insufladores (espaçadas de 112mm).

Para garantir um fluxo homogêneo de ar em todos os insufladores optou-se por plenum em forma de cunha com as seguintes características:

- Velocidade do ar no plenum: 5 m/s
- Secção na entrada de ar no plenum: 500 x 1590 mm
- Secção na parte trasseira do plenum: 25 x 1590 mm
- perda de carga no plenum: 48 mm.c.a.

### 3.8. Isolamento e Camisa de Ar

Para conseguir uma partida mais rápida, preferiu-se utilizar pequena quantidade de tijolos refratários. A camisa de ar resfria a parede de refratários e mantém a temperatura de parede compatível com a perda para o ambiente.

Adotou-se uma vazão na camisa de 18400 kg de ar/hora e velocidade no interior da camisa de 10 m/s.

O tijolo refratário escolhido tem as seguintes características:

- Especificação ISO: 20/50
- Densidade aparente:  $580 \text{ kg/m}^3$
- Condutibilidade térmica:  $0,13 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C}$
- Análise química:

$\text{Al}_2\text{O}_3$ : 38%

$\text{Si O}_2$ : 52%

$\text{Ca O}$  : 1%

$\text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ : 0,8%

Verificou-se em vários combustores de escala industrial uma faixa desgastada na parede na altura de leito. Essa erosão se deve ao atrito da partícula fluidizada e a parede. Esse desgaste foi verificado também em unidades com parede de aço inoxidável.

Fornalhas em leito fluidizado de aplicação industrial utilizam refratários de carbeto de silício que tem alta resistência à abrasão. Como o desgaste ocorre em apenas uma faz e devido a alto custo desses tijolos refratários é interessante a utilização de refratário SiC apenas na região onde ocorre o desgaste. As características de refratário de carbeto de silício (queimado) estão abaixo relacionadas:

- Densidade aparente:  $2500 \text{ kg/m}^3$
- Análise química:

Si C : 60%

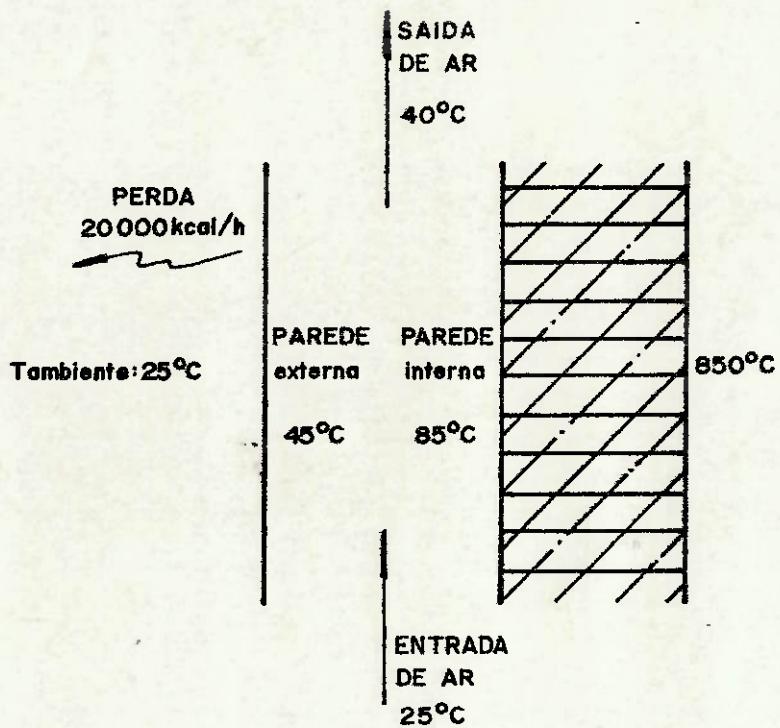
$\text{Al}_2\text{O}_3$ : 19%

Si O<sub>2</sub> 21%

Para o cálculo do perfil de temperatura foram adotados os seguintes valores de coeficiente de troca de calor:

- Parede externa (convecção natural e radiação):  $10 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$
- Camisa de ar (convecção forçada entre  $40 \text{ } ^\circ\text{C}$  e  $90 \text{ } ^\circ\text{C}$ ):  $15 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$
- Radiação da parede interna para a externa:  $7 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$
- Tijolo refratário (114mm):  $1,14 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$

Como o coeficiente de troca de calor do leito para a parede é alto em comparação com os coeficiente acima relacionados, adotou-se a temperatura interna igual a do próprio leito ( $850 \text{ } ^\circ\text{C}$ ).



Perfil de temperatura da camisa de ar

### 3.9. Recirculação de Partículas Finas Através de Ciclones

O ventilador de fluidização deve superar a perda de carga dos ciclones. Deve-se portanto prover qualquer entrada de material com sistemas que evitem a saída de gases quentes.

Existem três possibilidades para a colocação do sistema de ciclonagem:

1. Ciclones internos ao leito sem ar de diluição. Como a câmara de combustão está a  $850^{\circ}\text{C}$  os ciclones devem ser de aço inoxidável de custo muito elevado.

2. Ciclones internos com ar de diluição. Pode-se aproveitar o ar da camisa para diluir os gases de combustão até a uma temperatura próxima da utilização desses gases ( $500^{\circ}\text{C}$  a  $600^{\circ}\text{C}$ ).

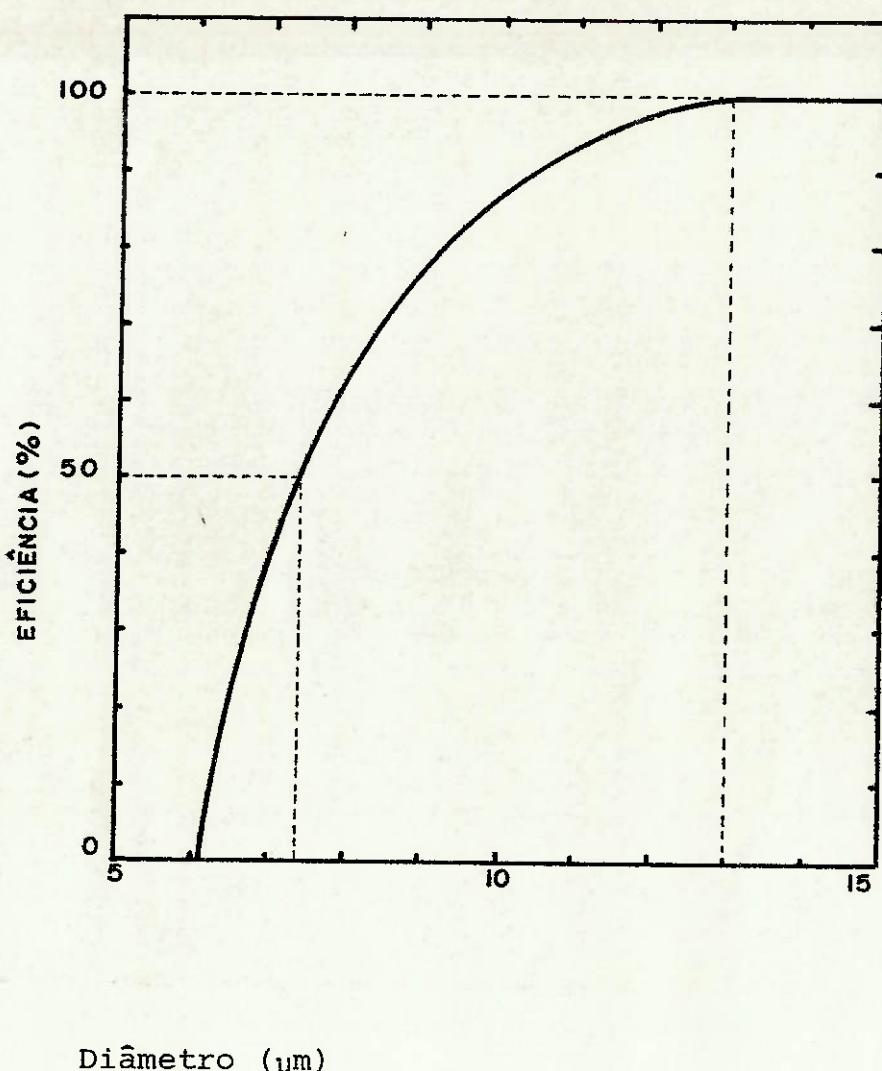
3. Ciclones externos com refratários internos sem ar de diluição.

A primeira opção foi descartada devido a alto custo. A segundo opção nos leva ao estudo da variação da vazão de gases de combustão através dos ciclones com a diminuição da temperatura. Esse estudo revelou que a vazão de gases aumenta consideravelmente na faixa de  $600^{\circ}\text{C}$  a  $500^{\circ}\text{C}$  abrindo a utilização de um número muito grande de ciclones. Optou-se então pelo aproveitamento de ciclones revestidos internamente com material refratário com as seguintes características:

- Vazão total de gases quentes:  $245000 \text{ m}^3/\text{hora}$
- Diâmetro do cilcone: 0,75 mm
- Quantidade: 12 ciclones em paralelo

Para os valores acima tem-se as seguintes condições de funcionamento:

- Diâmetro mínimo (0% de eficiência): 6,1  $\mu\text{m}$
- Diâmetro de corte (50% de eficiência): 7,4  $\mu\text{m}$
- Diâmetro crítico (100% de eficiência) 13,0  $\mu\text{m}$
- Velocidade dos gases na entrada do ciclone: 50 m/s
- Velocidade dos gases na saída do ciclone: 30 m/s
- Perda de carga no ciclone: 108 mm.c.a. (referida nas condições de funcionamento)
- Curva de eficiência do ciclone:



Adotando a granulometria abaixo dos finos arrastados e uma carga de pó de  $10\text{g}/\text{Nm}^3$  obtem-se a partir da curva de eficiência do ciclone uma carga de pó na saída dos ciclones de  $0,6\text{g}/\text{Nm}^3$ .

- Granulometria dos finos arrastados no leito

Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Concentração em massa
$< 5$	6%
$5 \leq d < 30$	19%
$30 \leq d < 100$	38%
$100 \leq d < 150$	33%
$d \geq 150$	4%

A partir dos dados acima obteve-se o seguinte balanço de massa no sistema de ciclonagem:

- Massa na entrada da ciclonagem: 570 kg/hora
- Massa na saída da ciclonagem: 35 kg/hora
- Massa retirada pela ciclonagem: 535 kg/hora
- Eficiência global do sistema: 94%

### 3.10. Alimentação e Partida do Leito

Visando minimizar os pontos de injeção de combustível optou-se por uma alimentação lateral com injeção de ar. A velocidade do ar que arrasta o combustível não deve ser menor que 25 m/s. Adotaram-se dois pontos de injeção no ponto mais alto do leito para possibilitar uma melhor distribuição do combustível. No caso de se utilizar carvão mineral ou outro combustível com alto teor de enxofre deve-se misturar pedra de calcário ou dolomita ao combustível na razão Ca/s de 3.

Levando-se em conta o fator segurança e a simplicidade do sistema, adotou-se uma partida com injeção de óleo diesel a partir de um nebulizador localizado na base do insuflador. Deve-se ter no mínimo 64 pontos de injeção de óleo. O queimador deverá ter uma chama longa para poder cobrir todo o leito. É aconselhável que se pré-aqueça o ar de fluidização na partida facilitando a fluidização do óleo.

Pesquisas sobre esse tipo de partida indicam que o sistema de partida deve ter no mínimo 25% da capacidade do combustor para se obter um aquecimento rápido do leito. Deve-se tomar cuidado para que o óleo não encharque o leito impedindo a fluidização.

### 3.11. Ventiladores de Fluidização e da Camisa de Ar

#### 1. Ventilador de fluidização

- Perda de carga do sistema: 1220 mm.c.a.
  - . no leito: 540 mm.c.a.
  - . distribuidor: 170 mm.c.a.
  - . plenum: 48 mm.c.a.
  - . tubulação: 30 mm.c.a.
  - . ciclonagem: 432 mm.c.a.
- Vazão do ventilador:  $61500 \text{ m}^3/\text{hora}$

#### 2. Ventilador da camisa de ar

- Perda de carga na camisa: 600 mm.c.a.
- Vazão do ventilador:  $15860 \text{ m}^3/\text{hora}$

Obs.: Todas as perdas de carga estão referidas a  $20^\circ\text{C}$  e nível do mar

### 3.12. Resumo das Condições i.e. Controle de Operação do Leito

Os gases quentes que saem da ciclonagem são diluidos com o ar da camisa de ar cuja vazão é mantida constante para qualquer condição de funcionamento da unidade de combustão. A tabela abaixo mostra as condições de operação do Gerador de Gases Quentes.

	Carvão Mineral (10% b.s.)		Lenha (25% b.u.)	
Capacidade	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
alimentação de combustível (kg/h)	4.210	1.683	5.000	2.000
vazão de ar de combustão (kg/h)	71.050	29.393	64.310	25.827
Temperatura dos gases após diluição com camisa de ar	665 °C	480 °C	625 °C	465 °C
vazão de ar falso para diluição até 450 °C (kg/h)	56.710	11.547	54.172	9.717
velocidade de fluidização	3,5 m/s	1,4 m/s	3,3 m/s	1,3 m/s

A diluição dos gases quentes para 450 °C é feita através da entrada de ar pelas janelas na câmara situado à entrada do secador. A depressão nessa câmara é de -10 mm.c.a.

O ventilador de fluidização não deve ser acionado sem que o ventilador da camisa de ar esteja ligada. Quando se deseja parar a unidade recomenda-se que o ventilador de fluidização não seja desligado antes que a temperatura do leito seja baixa suficiente para não afetar os standpipes (400°C a 500 °C).

Na partida do leito, para se evitar que o óleo encharque o leito é necessário que o queimador piloto, as resistências para pré-aquecimento do ar e o ventilador de fluidização estejam acionados.

A combustão pode ser controlada pela temperatura do leito através de um controle liga-desliga do sistema de alimentação. A alimentação adotada é um dosador vibratório e uma válvula rotativa. O controle deverá ser feito no dosador.

O sistema de retirada de cinzas deve ter altura controlada para possibilitar a retirada de material do leito e para o caso de se trabalhar com altura leito variável (nas condições máximo/mínimo).

BIBLIOGRAFIA

- KUNII, D. e LEVENSPIEL, O., *Fluidization Engineering*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1969
- LEVA, M., *Fluidization*, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1959
- DAVIDSON, J.F. e HARRINSON, D., *Fluidised Particles*, CUP, 1963
- DAVIDSON, J.F. e HARRINSON, D., *Fluidisation*, CUP, 1971
- CATIPOVIC, N.M., JOVANOVIC G.N. e FITZGERALD, T.J., *Regimes of Fluidization of Large Particles*, *AICHE Journal*, vol. 24, pag. 543, 1978
- WEN, C.Y. e YU, Y.H. *A Generalized Method of Predicting the Minimum Fluidization Velocity*, *AICHE Journal*, vol. 12, pag. 610, 1966
- KEAIRNS D.L., *Fluidization Technology*, Mc Graw-Hill Book Company, 1970
  - . NACK e al, *Fluidized - Bed Combustion Review*, pag. 339
- DAVIDSON, J.F. e KEAIRNS, D.L., *Fluidization Proceeding of the Second Engineering Foundation Conference*, CUP, 1978
  - . GIBBS, B.M. e HEDLEY, A.B., *Combustion of Large Coal Particles in a Fluidised Bed*, pag 235
  - . KOLENKO, T. e COLLIN, R., *Combustion of Coal in Fluidised Bed*, pag. 246
  - . TAYLOR, T.E., *Experimental results from an 0,46m Diameter Fluid Bed Pilot Plant*, pag. 258

- BAEYENS J. e GELDART D., Fluidized Bed Incineration - A Design Approach for Complete Combustion of Hydrocarbons, pag. 264
- NAUDE, D.D. e DUTKIEWICZ, R.K., Fluidized Bed Combustion of Poor Quality Coal, pag. 280
- AVEDESIAN, M.M. e DAVIDSON, J.F., Combustion of Carbon Particles in Fluidised Bed, TRANS. INSTN. CHEM. ENGRS, vol. 51, pag. 121, 1973
- PEEL, R.B., SANTOS, F.J., PARINI, G., CIAMPI G.J.S. e LUENGO, C.A., Combustão de Carvão Mineral e Combustíveis Vegetais em Leito Fluidizado, V Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM), nº AT-14, p.p. 313 - 322, 1979
- PEEL , R.B. e LUENGO C.A., Combustion of Charcoal and High Ash Coal in a Fluidized Bed, VI Encontro Sobre Escoamento em meios Porosos, 1978