

2736014

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
P R O J E T O M E C Â N I C O

LEITO FLUIDIZADO PARA QUEIMA DE TURFA (PARTE II)

Aluno: Renato Pereira Pinto Dias

Orientador: Prof. Hildo Pera

1984

APRESENTAÇÃO

Esse trabalho foi realizado em conjunto por Renato Pereira Pinto Dias e Roberto da Silva Picos e é composto de duas partes desenvolvidas individualmente.

Na primeira parte, são analisadas características das reservas brasileiras de turfa, e é feito um estudo teórico do processo de fluidização para queima desse combustível, onde é exposto o mecanismo de troca de calor e a influência de seus parâmetros no processo.

Esta segunda parte trata do projeto de um leito fluidizado, contendo os cálculos desenvolvidos para satisfazer a exigência básica do projeto, qual seja a capacidade de fornecer 250.000 Kcal. utilizando a turfa como combustível.

O cálculo baseia-se nas expressões obtidas na literatura e em informações fornecidas pelo nosso orientador, professor Hildo Pera, que possui vasta experiência no assunto.

SUMÁRIO

Este volume contém a segunda parte do trabalho, em que tratamos do projeto de um combustor, para queima de turfa em leito fluidizado.

Apresentamos inicialmente os dados sobre a turfa a ser utilizada.

A bibliografia nos fornece diversos modelos matemáticos que procuram representar os processos envolvidos neste tipo de equipamento, os quais resultam de uma longa série de experiências, realizadas principalmente na Europa e E.U.A.

Tais relações foram apresentadas à medida que se tornavam necessárias para o desenvolvimento do nosso trabalho.

Fizemos ainda algumas considerações quanto ao controle e instrumentação do processo, além de avaliar o efeito do resultado da combustão sobre o meio ambiente.

Finalmente, apresentamos alguns desenhos com o objetivo de orientar a fabricação do combustor e seus componentes mais importantes.

ÍNDICE

Apresentação	i
Sumário	ii
Índice	iii
1. Definição das Características	1
2. Determinação do Poder Calorífico da Turfa	2
3. Consumo de Combustível	3
4. Determinação do Volume dos Fluidos	4
5. Velocidade Mínima de Fluidização	8
6. Perda de Carga no Leito	12
7. Definição do Leito	15
8. Quantidade de Areia para Partir o Leito	17
9. Transferência de Calor no Leito	18
10. Controle de Poluição	27
11. Perda de Carga Total	34
12. Alimentação e Partida	37
13. Instrumentação e Contrôles	39
14. Considerações Finais	41
Bibliografia	

A meus pais,

que me ajudaram a concluir
este curso de engenharia.

1. DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS

O objetivo deste trabalho é projetar um combustor de leito fluidizado, com o qual seja possível estudar o processo de combustão da turfa neste tipo de equipamento.

A capacidade nominal do equipamento de gerar 250.000 Kcal/h usando turfa como combustível é a única imposição do projeto.

Os gases quentes produzidos em um combustor deste tipo podem ter diversas aplicações, tais como produção de vapor ou secagem de grãos.

No entanto não especificaremos qual será essa aplicação, sendo o calor gerado trocado com o ar externo.

Suas principais dimensões, bem como os tipos de construção utilizados, serão introduzidos oportunamente durante o desenvolvimento do projeto.

Como complemento ao combustor, serão colocados também equipamentos fundamentais para permitir a correta operação do leito, e controle de suas condições de funcionamento, que possibilitarão uma posterior avaliação do projeto.

2. DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DA TURFA

Podemos determinar o poder calorífico inferior da turfa a partir da sua composição elementar e do calor de combustão de seus elementos ou compostos gasosos. A fórmula de Dulong's é um método de obtermos o poder calorífico inferior:

$$PCI = 8100 c + 2900 \left(h - \frac{o}{8} \right) + 2500s - 600w$$

No caso da turfa por nós utilizada teremos a seguinte composição:

c = teor de carbono	= 36,3%
h = teor de hidrogenio	= 3,5%
o = teor de oxigênio	= 22,3%
s = teor de enxôfre	= 0,7%
n = teor de nitrogênio	= 2,2%
w = teor de umidade	= 25,0%
z = teor de cinzas	= 10,0%

o que resultará em um poder calorífico inferior igual a:

$$PCI = 2829 \text{ Kcal/kg}$$

A seguir podemos determinar o poder calorífico superior (PCS), partindo da definição:

$$PCS = PCI + (9h + w) 600$$

Portanto: $PCS = 3168 \text{ Kcal/Kg}$

3. CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Uma vez calculado o PCI da turfa que será por nós empregada, podemos obter o consumo de combustível para produzir as 250.000 Kcal/h desejadas, lembrando que assumimos a hipótese de não haver perdas de combustível não queimado nas cinzas.

$$Q_u = 250.000 \text{ Kcal}$$

$$\text{PCI} = 2829 \text{ Kcal/Kg}$$

$$\eta = 93\% \text{ (adotado)}$$

$$B = \frac{Q_u}{\text{PCI} \times \eta} = \frac{250.000}{2829 \times 0,93}$$

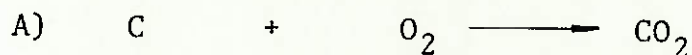
$$B = 95,02 \text{ Kg/h}$$

4. DETERMINAÇÃO DO VOLUME DOS FLUÍDOS

A combustão da turfa, assim como de outros combustíveis sólidos, ocorre com a oxidação do carbono, do hidrogênio e do enxôfre que os constituem.

Consideraremos que estas reações de oxidação ocorrerão de forma total por ser o combustor de leito fluidizado.

São as seguintes as equações que regem esse processo:

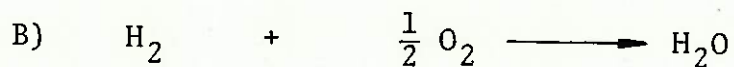


$$\begin{array}{ccc} 1 \text{ mol} & 1 \text{ mol} & 1 \text{ mol} \\ 12,01 \text{ Kg} & 22,39 \text{ Nm}^3 & 22,26 \text{ Nm}^3 \end{array}$$

portanto 1 Kg de carbono

$$\text{necessita } \frac{22,39}{12,01} = 1,864 \text{ Nm}^3 \text{ de oxigênio}$$

$$\text{produzindo } \frac{22,06}{12,01} = 1,8535 \text{ Nm}^3 \text{ de dióxido de carbono}$$

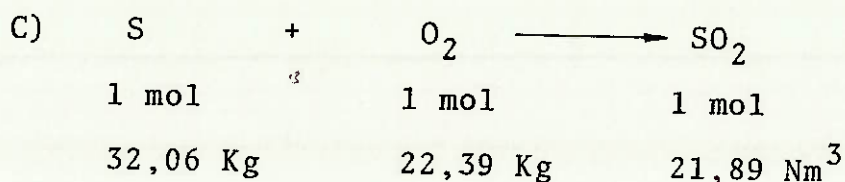


$$\begin{array}{ccc} 1 \text{ mol} & 1 \text{ mol} & 1 \text{ mol} \\ 2,016 \text{ Kg} & 11,195 \text{ Nm}^3 & 22,4 \text{ Nm}^3 \end{array}$$

portanto 1 Kg de hidrogênio

$$\text{necessita } \frac{11,195}{2,016} = 5,56 \text{ Nm}^3 \text{ de oxigênio}$$

$$\text{produzindo } \frac{22,4}{2,016} = 11,11 \text{ Nm}^3 \text{ de vapor d'água}$$



portanto 1 Kg de enxôfre

necessita $\frac{22,39}{32,06} = 0,697 \text{ Nm}^3$ de oxigênio

produzindo $\frac{21,89}{32,06} = 0,693 \text{ Nm}^3$ de dióxido de enxôfre

Volume de Ar

Podemos agora obter o volume de oxigênio teoricamente necessário para a combustão.

Tendo: $c = 36,3\%$

$h = 3,5\%$

$o = 22,3\%$

$s = 0,7\%$

calculamos:

$$V_{\text{O}_2}^t = 1,864c + 5,56 \left(h - \frac{o}{8} \right) + 0,697s$$

$$V_{\text{O}_2}^t = 0,721 \text{ Nm}^3/\text{Kg combustível}$$

O volume de ar teórico para a combustão pode ser calculado ao considerarmos que no ar temos 21% de oxigênio.

De acordo com a seguinte equação temos

$$V_{ar}^t = \frac{V_{O_2}^t}{0,21} = 8,876c + 26,443 \left(h - \frac{0}{8} \right) + 3,322s$$

$$V_{ar}^t = 3,434 \text{ Nm}^3/\text{Kg de combustível}$$

Sabemos que nos processos de combustão tradicionais, o volume de ar teórico não é suficiente para que a combustão se faça de modo absoluto, sendo necessário um excesso de ar para que tal ocorra. Certos cuidados são necessários na determinação desse excesso de ar, pois se por um lado o pouco ar em excesso pode causar a combustão incompleta e portanto a perda de combustível, por outro lado o demasiado ar excedente provoca a perda de calor sensível pela chaminé e a conseqüente redução do rendimento térmico.

No caso de combustores de leito fluidizado, em que a velocidade e a turbulência envolvidas no processo são elevadas, facilitando a queima do material, um excesso de ar de 20% pode ser utilizado com segurança de obtermos resultados satisfatórios.

Portanto:

$$m = 1,2 \quad V_{ar}^r = V_{ar}^t \cdot m = 4,12 \text{ Nm}^3/\text{Kg combustível}$$

Volume dos Gases da Combustão

Segundo ainda a mesma linha de raciocínio até então desenvolvida temos que o volume de gases produzido por quilograma de combustível é dado por:

$$V_g^t = 1,8535c + 0,683s + 0,8 + (9h + w) \times 1,24 + 0,79 V_{ar}^t$$

Devido ao excesso de ar m , o volume real de gases é dado por

$$V_g^r = V_g^t + (m - 1)V_{ar}^t$$

$$V_g^r = 1,8535c + 0,683s + 0,8 + (9h + w)1,24 + 0,79V_{ar}^t + (m-1)V_{ar}^t$$

$V_g^r = 5,145 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$ de combustível, ou se desejarmos podemos escrever:

$$V_g^{r'} = V_g^r \cdot B = 5,145 \cdot 95,02$$

$$V_g^{r'} = 488,3 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

5. VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO

Antes de calcularmos a velocidade mínima de fluidização, é conveniente que façamos alguns comentários a respeito das dimensões das partículas que comporão o leito fluidizado. Demonstra-se experimentalmente que quanto maior forem os pedaços de turfa utilizados, menor será a quantidade de combustível elutriada, ou seja, arrastada pelos gases para a chaminé (explicaremos mais adiante este processo).

Por outro lado, se o material particulado fôsse de dimensões muito grandes, exigiriam que a velocidade de fluidização fôsse de igual forma elevada, resultando na impossibilidade de aplicação do processo.

Experiências têm sido realizadas (1) com diversos materiais e com diferentes dimensões para compor o leito em equipamentos com diâmetros também diversos. Investigações feitas para queima de carvão parecem indicar que a eficiência de combustores deste tipo é consideravelmente melhorada pelo uso de partículas de combustível com dimensões entre 6 e 25 milímetros.

Além disso, consegue-se menor emissão de NO, uma maior geração de calor por unidade de volume e uma sensível redução do fenômeno de elutriação. Verificou-se ainda que, ao contrário do que se imaginava, a introdução de partículas maiores no leito não causou problemas de mistura, não se constatando o fenômeno de segregação de modo a prejudicar o processo.

Isto pode ser explicado pelo fato de que há uma tremenda agitação dos sólidos que compõem o leito e qualquer partícula de maior tamanho é facilmente quebrada e erodida, atingindo rapidamente dimensões menores.

O motivo de haveremos feito estas considerações iniciais baseadas em experiências com carvão é que não existe até o momento qualquer literatura a respeito da queima da turfa em leito fluidizado, embora tenhamos conhecimento, através de boletins científicos, da existência de experiências e nível de pesquisa.

A turfa não é um material quebradiço como o carvão, apresentando-se quando úmida como uma argila. Tal característica nos obriga a introduzi-la no leito fluidizado na forma de pelotes que, pelos motivos acima citados, rapidamente se reduzem a partículas de tamanho inferior a 6 mm, tanto pelo efeito da erosão como pelo efeito da combustão.

Dito isto, vamos apresentar alguns fatores que serão de grande importância para o cálculo da velocidade de fluidização:

1 - Composição do Leito

O leito é composto por uma mistura constituída de 20% de turfa e 80% de areia, cujos pesos específicos e diâmetro médio são:

$$\gamma'_t = 950,0 \text{ Kgf/m}^3 = \text{peso específico da turfa}$$

$$\gamma'_a = 2200,0 \text{ Kgf/m}^3 = \text{peso específico da areia}$$

$$d_t = 8,0 \text{ mm} = \text{diâmetro médio dos pedaços de turfa}$$

$$d_a = 1,3 \text{ mm} = \text{diâmetro médio dos grãos de areia}$$

Para o material do leito, vamos estabelecer a seguinte equivalência:

$$\gamma' = 0,2 \gamma'_t + 0,8 \gamma'_a = 1950 \text{ Kgf/m}^3$$

$$d = 0,2 d_t + 0,8 d_a = 2,24 \text{ mm}$$

2 - Fator de Forma

Os pedaços de turfa pouco após sua introdução no leito, tem seu tamanho reduzido, e seu formato é irregular. Assumiremos para efeito de cálculo, uma aproximação pela forma cúbica, cuja aresta é dada pelo diâmetro equivalente calculado acima.

Sendo

$$S = 6D^2 = 30,1 \text{ mm}^2 = \text{área externa}$$

$$V = D^3 = 11,23 \text{ mm}^3 = \text{volume}$$

o fator da forma é dado por (4)

$$\Psi = 0,205 \frac{S}{V^{(2/3)}} = 1,23$$

3 - Cálculo da Velocidade de Fluidização

A partir do desenvolvimento teórico descrito por Zabrodsk (2), que parte do equacionamento da perda de carga, chegamos à seguinte expressão para a velocidade mínima de fluidização:

$$w_f = 1,58 \times 10^{-4} \frac{d^{1,82}}{V^{0,88}} \left(\frac{\gamma_M - \gamma_m}{\gamma_m} \right)^{0,94}$$

onde:

$$\mu = 1,97 \times 10^{-5} \text{ Kg/m.s} = \text{viscosidade dinâmica do ar}$$

$$\gamma_n = 1,12 \text{ Kg/m}^3 = \text{peso específico do leito}$$

$$\rho = \gamma_m/g = 1,12 \text{ Kg/m}^3$$

$$\nu = \mu/\rho = 1,76 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} = \text{viscosidade cinemática do ar}$$

Substituindo estes valores na expressão acima, obtemos:

$$w_f = 0,054 \text{ m/s}$$

Confrontando-se este valor com os valores obtidos na prática por outros pesquisadores em leitos fluidizados, em condições semelhantes, observamos que tal velocidade é muito baixa para promover a fluidização. Concluimos então que esta fórmula não se aplica aos componentes do nosso leito.

Na verdade, para leitos de características semelhantes (1), espera-se velocidades da ordem de 2 m/s.

Vamos experimentar uma outra relação empírica fornecida por Miller (3) que possivelmente se adapte ao nosso caso, e que é:

$$w_f = \frac{g (\rho_M - \rho_m)^{0,9} d^2 \rho_m^{0,1}}{800 \cdot \mu}$$

Para esta expressão apresentada por Miller obtivemos:

$$w_f = 2,65 \text{ m/s}$$

Este valor deve ainda ser corrigido pelo fator de forma que já calculamos.

$$w_f = 2,65 \cdot \psi = 3,3 \text{ m/s}$$

Lembramos que este é um valor calculado com base em fórmulas empíricas, que certamente não pôde levar em conta todas as variáveis envolvidas em um processo complexo como o da fluidização. Desta forma, uma variação em torno deste valor pode ser esperada quando do funcionamento do leito.

6. PERDA DE CARGA NO LEITO

Para a ocorrência da fluidização é necessário que a perda de carga do fluido através do leito seja aproximadamente igual ao peso dos sólidos por unidade de área da secção transversal do leito. É certo que à medida que o leito se expande, a sua altura aumenta, mas podemos admitir que a perda de carga permaneça constante devido à mudança de comportamento das partículas no que tange ao atrito entre as partículas e o fluido e com as paredes do leito.

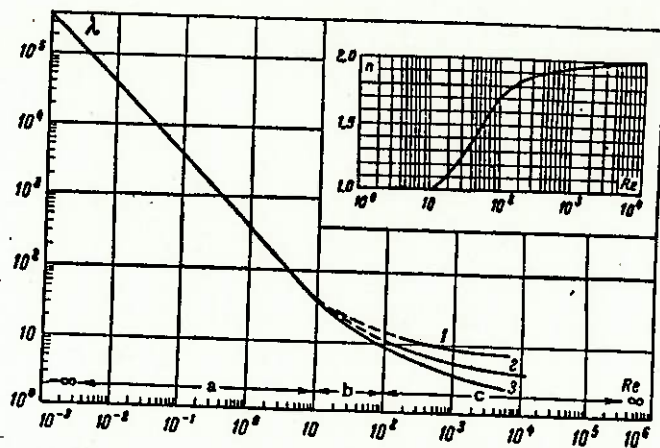
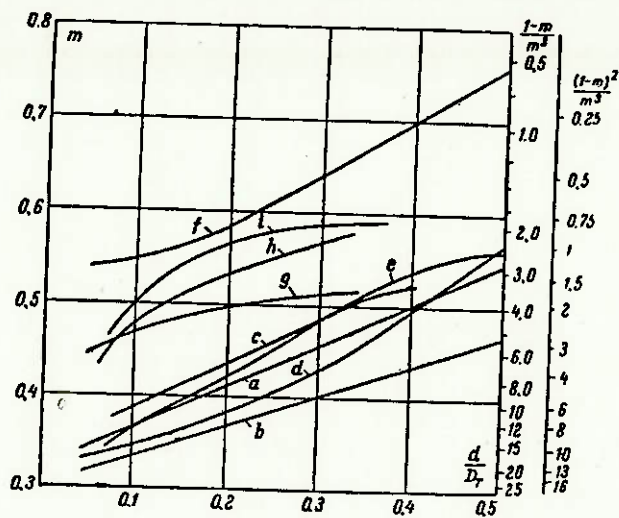
Os seguintes fatores influem no cálculo da perda de carga:

1 - Porosidade do Leito

Conhecida a relação entre o diâmetro equivalente das partículas e o diâmetro do leito, que vamos supor ser 0,4m, podemos obter a porosidade do gráfico da página seguinte (2).

$$\frac{d}{D} = 5,6 \times 10^{-3} \quad M = 0,33$$

Segundo prolongamento da curva b que representa materiais semelhantes à turfa.



2 - Segundo o mesmo autor e conforme os outros gráficos a seguir, encontramos o expoente e o fator de atrito para a suposição de regime de transição tal que $10 < Re < 1000$, e:

$$\lambda = 10 \quad e \quad n = 1,8$$

A queda de pressão é dada por:

$$\Delta P = 2 \lambda \frac{H}{d} w_f^2 \frac{\rho m}{g^2} \frac{(1 - m)^{3-n}}{m^3} \cdot \varphi^{3-n}$$

substituindo esses valores já determinados, temos que

$$\Delta P = 2,0 \text{ Kgf/cm}^2$$

A expressão acima é dada por Leva (2) e resulta de um grande número de experiências com diversos materiais, tendo se mostrado eficiente para a maioria dos pesquisadores.

O valor H da altura do leito de 0,8 foi adotado após um estudo preliminar das características do leito que foi feito simultaneamente com este capítulo e que será apresentado a seguir.

7. DEFINIÇÃO DO LEITO

A esta altura, já podemos estabelecer algumas das dimensões fundamentais do leito que serão inclusive utilizadas para determinarmos outros itens deste projeto, como por exemplo, a perda de carga e a troca de calor no leito.

Verificamos que a grande maioria dos equipamentos com os quais foram obtidas as equações aqui apresentadas apresentavam secção transversal circular. Isto nos induz a escolher este tipo de secção transversal.

Quanto ao material de construção empregado, o leito deve ser revestido e ter sua estrutura central constituída de um tubo de concreto refratário, cujas paredes devem ter cerca de 8 polegadas. Externamente ã esse tubo, colocaremos ainda uma fileira de tijolos comuns. Finalmente uma última camada de lâ de rocha como isolante antes de encontrarmos a chapa de aço de revestimento externo.

Dos valores já obtidos, achamos a área e a seguir o diâmetro do leito. Passando a vazão de ar insuflado para as condições de pressão e temperatura do leito

$$V_{ar}^r = 4,12 \text{ Nm}^3/\text{h} = 0,11 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$\text{No leito: } V_{ar}^{r*} = \frac{P_o}{P_e} \cdot \frac{T_e}{T_o} V_{ar}^r = \frac{1}{1,7} \cdot \frac{1123}{273} \cdot 0,11$$

$$V_{ar}^{r*} = 0,266 \text{ m}^3/\text{s}$$

onde:

$$w_f = 3,3 \text{ m/s} = \text{velocidade mínima de fluidização}$$

$$H = 0,8 \text{ m} = \text{altura do leito expandido}$$

$$P = 2 \text{Kgf/cm}^2 = \text{perda de carga através do leito}$$

$$T_1 = 850^\circ\text{C} = \text{temperatura dos gases do leito}$$

$$P_e = 1,7 \text{Kgf/cm}^2 = \text{pressão média no leito}$$

Assim, a área da secção transversal do equipamento é calculada a seguir:

$$A_{\text{leito}} = \frac{V_{\text{ar}}^{r*}}{w} = \frac{0,266}{3,3} = 0,08 \text{ m}^2$$

e como $A = \frac{\pi D^2}{4}$, o diâmetro calculado do leito será $D = 0,32 \text{ m}$

Conforme recomendado (1) o aparelho deve possuir uma altura total de aproximadamente duas vezes a altura do leito expandido, que será $H_0 = 1,5 \text{ m}$.

8. CÁLCULO DA QUANTIDADE DE AREIA PARA PARTIR O LEITO

A quantidade de areia para partir o leito fluidizado, dadas as condições deste projeto, é calculada partindo-se da definição de porosidade.

$$m = \frac{\rho_M - \rho_{\text{máx}}}{\rho_M - \rho_m}$$

Sendo que $\rho_M = 1.950 \text{ Kg/m}^3$

$$\rho_m = 1,12 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{máx}} = 1.100 \text{ Kg/m}^3 \text{ (após a fluidização)}$$

$$m = 0,34$$

Sendo o volume do leito fluidizado $V_1 = 0,064 \text{ m}^3$

A massa de areia é dada por

$$M_a = \rho_{\text{máx}} \times V_1 = 1100 \times 0,064 = 70,4 \text{ Kg}$$

A altura da areia antes da fluidização será dada por

$$V_o = \frac{M_a}{\rho_M} = \frac{70,4}{1950} = \frac{\pi D^2}{4} H_a = (0,08)H_a$$

$H_a = 0,45 \text{ m}$ é a altura de areia no leito antes da fluidização.

9. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Já vimos que o calor a ser produzido é um dado de projeto e deve ser $Q_u = 250.000 \text{ Kcal/h}$. Admitimos que esse calor seja trocado com a superfície lateral do leito e da câmara e a seguir com o ar atmosférico adicionado aos gases antes de fazê-los passar pelo ciclone onde serão limpos.

Vamos analisar separadamente essas três etapas.

A - Troca de Calor na Região do Leito

No leito fluidizado a troca de calor com as paredes pode ser expressa através da relação

$$Q_1 = A_1 \cdot \alpha_E (T_1 - T_{\text{par}})$$

onde:

$$A_1 = \text{superfície de troca de calor do leito} = HD = 0,8 \text{ m}^2$$

$$T_1 = \text{temperatura do leito} = 850^\circ\text{C}$$

$$\alpha_E = \text{coeficiente de troca de calor equivalente entre o leito e as paredes.}$$

$$t_{\text{par}} = \text{temperatura da parede do leito} = 800^\circ\text{C}$$

O valor para α_E é dado pelo seguinte equacionamento, definido por Zabrodsky (2) a partir de dados experimentais:

$$\alpha_E = (\alpha_{\text{cond}} + \alpha_{\text{conv.}}) + \alpha_{\text{rad}}$$

O primeiro termo envolve condução e convecção:

$$(\alpha_{\text{cond}} + \alpha_{\text{conv.}}) = C_M \gamma_M W_n (1-m) .$$

$$\cdot \left[1 - \exp \left[- \frac{1,2 \cdot \lambda_m}{\delta_{\text{par}} C_M \gamma_M W_n (1-m)^{1/3}} \right] \right]$$

O segundo termo envolve apenas radiação e é dado por:

$$\text{rad} = 4,9 E_1 \left[\frac{\left(\frac{\theta_{1t}}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{par}}}{100} \right)^4}{\theta_{1t} - t_{\text{par}}} \right]$$

Vamos então definir os parâmetros que influenciam nas equações acima:

$$C_M = \text{calor específico da mistura areia e turfa} = 0,3 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$$

(adotado)

$$\gamma_M = \text{peso específico das partículas} = 1950 \frac{\text{Kgf}}{\text{m}^3}$$

$$m = \text{porosidade do leito} = 0,33$$

$$\lambda_M = \text{calor específico do ar} = 0,275 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$$

$$\delta_{\text{par}} = \text{espaçamento entre as partículas} = 0,7 \times 10^{-3} \text{m e as paredes vizinhas}$$

$$E_1 = \text{emissividade do revestimento} = 0,8$$

$$\theta_{1t} = \text{temperatura máxima do leito é a própria temperatura da chama} = 1000^\circ\text{C}$$

A componente da velocidade de fluidização normal às paredes do leito deve ser calculada conforme a expressão abaixo.

Isto porque a temperatura é assumida a partir de considerações técnicas e então a velocidade normal das partículas deve ser calculada para endossar tal valor.

Com isso garantimos que a diferença $- \theta_{1t}$ seja constante.

Calculamos W_n pela expressão:

$$\left[W_m \right]^{-1} = \left[\frac{C_M \delta'_M (1-m)^{1/3}}{118,5 E_1} \right] \cdot \left\{ \frac{\ln \left(\frac{(T_{par} + \theta) \cdot (T_{par} - \theta_{1t})}{(T_{par} - \theta) \cdot (T_{par} + \theta_{1t})} \right)}{2} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{1}{T_{par} 10^{-3}} \right]^3 + \operatorname{arctg} \frac{\theta}{T_{par}} - \operatorname{arctg} \frac{\theta_{1t}}{T_{par}} \right\}$$

Portanto: $W_n = 0,21 \text{ m/s}$

Podemos agora calcular

$$(\alpha_{cond} + \alpha_{conv}) = 0,3 \cdot 1950 \cdot 0,21 \cdot (1 - 0,33).$$

$$\cdot \left[1 - \exp \left[\frac{-1,2 \cdot 0,275}{0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot 1950 \cdot 0,21 (1-0,33)^{0,33}} \right] \right]$$

$$(\alpha_{cond} + \alpha_{conv}) = 80,54 \text{ Kcal/hm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\alpha_{rad} = 4,9 \cdot 0,8 \cdot \left[\frac{\left(\frac{1273}{100} \right)^4 - \left(\frac{1073}{100} \right)^4}{1273 - 1073} \right]$$

$$\alpha_{rad} = 238,97 \text{ Kcal/h.m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Com esses valores obtidos, podemos calcular o coeficiente equivalente

$$\alpha_E = 319,51 \text{ Kcal/hm}^2\text{°C}$$

O calor trocado no leito será:

$$Q_1 = \alpha_E A_1 (\theta - T_{\text{par}})$$

$$Q_1 = 319,51 \cdot 0,8 \cdot (850 - 800)$$

$$Q_1 = 12780,4 \text{ Kcal/h}$$

B - Calor Trocado na Câmara de Combustão

Consideramos aqui como câmara de combustão, a região imediatamente acima do leito, na qual a troca de calor entre os gases e a superfície lateral ocorre principalmente por convecção e radiação. O calor absorvido por irradiações é calculado pela expressão de Stefan-Boltzmann. No entanto, esta lei refere-se somente à parcela de irradiação luminosa.

Na verdade, a composição dos gases envolvidos no processo de troca de calor é que determinará a necessidade de calcularmos ou não a parcela absorvida por irradiação gasosa.

Tal determinação decorre de estudos relativamente recentes (5), advindos da constatação da existência de dados obtidos da operação de geradores de vapor, contraditórios com os cálculos de calor absorvido.

Constatou-se que dos constituintes dos gases da combustão, somente o CO_2 e o vapor d'água são bons receptores e emissores de calor.

Gases como o N_2 , H_2 , O_2 e SO_2 podem ser, do ponto de vista prático, considerados não irradiantes.

Os gases emitem e absorvem energia calorífica apenas dentro de certas faixas de comprimento de onda, que podem variar de um gás para outro.

A quantidade de calor trocada por irradiação gasosa depende:

- . da temperatura do gás;
- . da sua concentração;
- . da espessura da camada;
- . da pressão parcial na mistura gasosa.

Já vimos que:

* 1 Kg de C produz $1,8535 \text{ Nm}^3$ de CO_2

* 1 Kg de H_2 produz $11,11 \text{ Nm}^3$ de H_2O

o que nos leva a uma produção de:

$$V_{\text{CO}_2} = B \cdot C \cdot 1,8535 = 95,02 \cdot 0,363 \cdot 1,8535 = 63,93 \frac{\text{Nm}^3 \text{CO}_2}{\text{h}}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = B \cdot h \cdot 11,11 = 95,02 \cdot 0,035 \cdot 11,11 = 36,94 \frac{\text{Nm}^3 \text{H}_2\text{O}}{\text{h}}$$

Conhecido o $V_g^r = 488,3 \text{ Nm}^3/\text{h}$

$$p(\text{CO}_2) = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_g^r} = \frac{63,93}{488,3} = 0,130$$

$$p(\text{H}_2\text{O}) = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{g}}} = \frac{36,94}{488,3} = 0,075$$

Considerando que a temperatura dos gases seja igual a 800°C e que as paredes estejam a 750°C. A bibliografia (5) apresenta diagramas que fornecem os valores para os coeficientes de troca de calor do gás carbônico e do vapor d'água.

$$\text{CO}_2 = 5,1 \text{ Kcal} / \text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 6,4 \text{ Kcal} / \text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$T = 10,5 \text{ Kcal} / \text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

Estamos considerando uma região de fluxo interno, forçado e turbulento, para a qual o coeficiente de troca de calor por convecção, pode ser encontrado pela seguinte (6) expressão obtida de dados experimentais:

$$N_{n_m} = \frac{h D}{K} = 5 + 0,016 \text{ Re}^a \cdot \text{Pr}^b$$

$$a = 0,88 - \frac{0,24}{4 + \text{Pr}}$$

$$a = 0,88 - \frac{0,24}{4 + 0,688} = 0,83$$

$$\text{Pr} = 0,688 \text{ (adotado)}$$

$$\text{Re} = \frac{V D}{\nu} \quad V = 3,3 \text{ m/s} \quad D = 0,32 \text{ m} \quad \nu = 1,97 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Re} = 5,36 \times 10^4$$

$$b = 0,33 + 0,5 \exp(-0,6 \text{ Pr})$$

$$b = 0,33 + 0,5 \exp(-0,6 \times 0,688) = 0,66$$

Portanto

$$N_{n_m} = 5 + 0,016 (5,36 \cdot 10^4)^{0,83} \cdot (0,688)^{0,66} = 110,2$$

Utilizando agora o lado esquerdo da equação acima, podemos calcular o valor do coeficiente h (α_c) para troca de calor por convecção:

$$N_{n_m} = 110,2 = \frac{h D}{K}$$

$$h = 13,78 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$h = \alpha_c = 11,90 \text{ Kcal/hm}^2\text{°C}$$

$$K = 0,04 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$D = 0,32 \text{ m}$$

O calor trocado por radiação pela superfície lateral A acima do leito:

$$Q_R = \sigma A (T_g^4 - T_p^4)$$

e o calor trocado por convecção é:

$$Q_c = (\alpha_R + \alpha_c) \cdot A \cdot (T_g - T_p)$$

onde:

$$A = 0,7 \cdot 0,32 \cdot \pi = 0,71 \text{ m}^2$$

$$\sigma = 4,88 \times 10^{-8} \text{ Kcal/hm}^2\text{K}$$

$$T_g = \text{temperatura dos gases} = 1123^\circ\text{K}$$

$$T_p = \text{temperatura das paredes} = 1073^\circ\text{K}$$

Portanto

$$Q_R = 4,88 \cdot 10^{-8} \cdot 0,71 (1123^4 - 1073^4) = 9.177,8 \text{ Kcal/h}$$

$$Q_C = (10,5 + 11,9) \cdot 0,71 (50) = 795,2 \text{ Kcal/h}$$

e o calor total trocado na câmara do aparelho terá sido:

$$Q = Q_R + Q_C = 9973,0 \text{ Kcal/h}$$

O calor remanescente poderia ser lançado na atmosfera, incorporado aos gases resultantes. No entanto é preciso que os gases sejam limpos em um aparelho tipo ciclone, o qual sofreria sérios problemas de corrosão e desgaste, operando com gases a altas temperaturas.

3 - Troca de Calor com o Ar Atmosférico Antes do Ciclone

Vamos calcular a massa de ar m a ser misturada com os gases para que a temperatura resultante seja inferior a 400°C .

Supondo que os gases estejam a 800°C e admitindo C_{par} praticamente igual a C_{pg} , temos que o calor recebido pelo ar externo é igual ao calor cedido pelos gases ao passar de 800°C para 400°C , ou seja:

$$\frac{V_g^{r*} P}{R T} C_{pg} (T_g^i - T_g^f) = \dot{m} C_{par} (T_{ar}^f - T_{ar}^i)$$

$$\dot{m} = \frac{V_g^r \cdot 1123}{1,7 \cdot 273} \cdot \frac{95,02 \cdot 12000}{29,27 \cdot 1073} \frac{(800 - 400)}{(400 - 25)} = 481,5 \text{ Kg/h}$$

Portanto, para garantir que os gases entrem no ciclone à temperatura menor que 400°C, devem ser acrescidos pelo menos 480 kg/h de ar aos gases de combustão.

Assim, a vazão total de gases no ciclone será:

$$\dot{M}_c = 451,5 + 481,5 = 933,0 \text{ Kg/h}$$

ou em volume $\dot{V}_c = 1532,6 \text{ m}^3/\text{h}$

10. CONTRÔLE DE POLUIÇÃO

A - Remoção de Partículas

A.1 - Elutriação: Mecanismo do Fenômeno

O material dos leitos fluidizados reais é sempre composto por uma larga faixa de dimensões de partículas, e na maioria dos casos, a velocidade do fluido ultrapassa a velocidade de queda livre das partículas introduzidas no leito, ou, das partículas que têm seu tamanho muito reduzido pelo atrito com as partículas maiores.

Por esse motivo, ocorre o carregamento de finos (partículas menores) de todos os leitos fluidizados, fazendo-se necessário equipá-los com equipamentos de limpeza do ar.

Tais equipamentos vizam remover as pequenas partículas dos gases, antes que estes sejam lançados na atmosfera.

Os equipamentos mais utilizados são os ciclones, os filtros eletrostáticos e os lavadores de gases.

Convém observar que este carregamento nem sempre é indesejável, podendo ser utilizado, por exemplo, para remover de uma mistura de grãos, partículas de tamanho inferior ao desejado.

As leis que governam esse complexo processo ainda não foram suficientemente estudadas e há muito ainda por ser explicado.

A principal causa da elutriação é a diferença positiva entre a velocidade do fluido e a velocidade de queda livre das partículas ($W_f - W_{ff}$).

Alguns fatos dificultam o estudo desse fenômeno:

- a) Ejeção de partículas do leito por bolhas de gás que atravessam o leito fluidizado.
- b) A não uniformidade do campo de velocidades do gás acima do leito.
- c) Resistência do leito à difusão de finos para a superfície do leito fluidizado.

Ao serem lançadas para acima do leito, as partículas atingem uma certa altura, caindo novamente no leito fluidizado.

A esta altura, dá-se o nome de altura de desprendimento.

Se a altura livre acima da superfície do leito for menor que a altura de desprendimento, as partículas lançadas atingirão as aberturas de saída dos gases do equipamento onde as velocidades são bem maiores, e serão carregadas para fora do leito fluidizado.

A uniformização do fluxo de gases a partir da grade de distribuição é um fator que contribui para diminuir o carregamento de partículas. A altura do leito também influi na elutriação de partículas, tendo-se observado que para leitos mais profundos a não uniformidade inicial nas partes superiores provoca o aumento da elutriação. Por outro lado, os problemas de não uniformidade do fluxo causados pela grade distribuidora são menos sensíveis à medida que a altura do leito aumenta. Portanto, a avaliação de qual a melhor altura, depende de um estudo profundo de cada caso.

A resistência à difusão em direção à superfície do leito é um fator que evita a elutriação.

A difusão dos finos em direção à superfície do leito é também bloqueada pelos interstícios entre as partículas maiores.

O equilíbrio entre as partículas de tamanhos diferentes é maior à medida em que a velocidade dos gases diminui.

Embora o projeto de nosso equipamento procure evitar a elutriação à partir de sua concepção, podemos concluir da exposição acima que a elutriação é um fenômeno que sempre ocorre para pelo menos uma certa gama de dimensões de partículas.

Com o objetivo de não lançar tais partículas na atmosfera com os gases é que colocaremos um ciclone à saída do leito fluidizado.

A.2 - Dimensionamento do Ciclone

Os ciclones têm sido extensamente usados para a separação de partículas em suspensão nos gases, apresentando ótima eficiência para partículas com mais de 50 microns. Seu princípio de funcionamento está baseado na ação da força centrífuga sobre as partículas.

O fluxo de gás carregado com pó é em geral introduzido no ciclone pela parte superior, a qual é formada por um cilindro de raio R_2 , possuindo na parte inferior um tronco de cone.

O duto de entrada possui secção retangular e é colocado tangencialmente ao corpo do ciclone, descrevendo 360° no interior do mesmo em hélice.

Assim, os gases introduzidos geram um movimento rotativo para baixo, entre as paredes do corpo do ciclone e do tubo de saída de gases (que é colocado concentricamente com o eixo do aparelho), formando um vórtice periférico.

Após se chocarem contra as paredes do ciclone, as partículas de poeira se movem para baixo e são removidas pelo tubo de descarga localizado no fim da parte cônica.

O fluxo de gás troca de direção ao atingir a parte cônica, movendo-se então para cima, através do tubo de exaustão, produzindo o vórtice interno.

O dimensionamento do ciclone será feito segundo a literatura e por não ser este o tema do trabalho, não nos deteremos a explicar detalhadamente este projeto. Para maiores esclarecimentos, sugerimos consultar a bibliografia adotada (7 e 8).

A partir da eficiência de 90% para partículas maiores que 10 microns, Peisakhov fornece uma tabela de onde selecionamos o tipo e o diâmetro básico para o dimensionamento, que são:

TIPO : V H - 15 (mais simples e econômico)

DIÂMETRO D = 400 mm

Uma outra tabela nos fornece o coeficiente de resistência aerodinâmica para esse equipamento, que é

$$E = 160$$

Admitindo que a densidade do gás utilizado no processo é aproximadamente igual à do ar, temos para as C.N.P.T. que:

$$T_2 = 273^\circ \text{ K}$$

$$T_1 = 400^\circ \text{ C} = 673^\circ \text{ K}$$

$$P_2 = 760 \text{ mm Hg}$$

$$P_1 = 780 \text{ mm Hg}$$

$$\rho_2 = 1,25 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_1 = ?$$

$$\rho_2 = \frac{1,25 \cdot 273 \cdot 780}{760 \cdot 673} = 0,52$$

A teoria referente ao assunto nos diz que a perda de carga nos ciclones é dada por

$$\Delta P = \frac{\rho E V^2}{2 g} \quad (\text{mm H}_2\text{O})$$

e que para cada tipo de ciclone existe um valor ótimo para $\Delta P/\rho$ que no nosso caso é definida por

$$50 < \frac{\Delta P}{\rho} < 70$$

Adotando $P/\rho = 60$, podemos calcular a velocidade nominal dos gases na passagem da parte cilíndrica do ciclone

$$V = \sqrt{\frac{2 g P}{E}} = \sqrt{\frac{2 \times 9,8 \cdot 60}{160 \times 0,52}} = 3,75 \text{ m/s}$$

Podemos agora calcular o diâmetro real do ciclone

$$D = \sqrt{\frac{V r^*}{g \cdot 900 \cdot \pi \cdot V}} = \sqrt{\frac{1531,6}{900 \cdot \pi \cdot 3,75}} = 0,38 \text{ m}$$

Este valor está bem próximo ao valor do diâmetro adotado no início, o que assegura a validade da escolha.

As demais dimensões do ciclone são dadas em função do diâmetro D e são as seguintes (em mm):

- Entrada
 - largura $b_1 = 0,26 D = 99$
 - altura $a = 0,66 D = 251$
 - comprimento $l = 0,6 D = 228$
- Largura de boca de entrada no plano da secção transversal que passa pela carcaça do ciclone $b = 0,2 D = 76$

- Corpo - Altura da parte cilíndrica $h_c = 2,26 D = 859$
- Altura da parte cônica $h_{co.} = 2 D = 760$
- Altura total $H_{tot} = 4,56 D = 1733$
- Distância do extremo inferior
 à primeira flange $h_f = 0,28 D = 106$
- Diâmetro do orifício de
 descarga $d_1 = 0,35 D = 133$

Um esquema do ciclone pode ser visto no desenho anexo ao trabalho.

B - Controle de Gases Poluentes

Já vimos que a remoção do material particulado arrastado para fora do leito fluidizado pode ser feita com o uso do ciclone por nós definido. No entanto, precisamos pensar na emissão de gases tóxicos que poderia ocorrer em função do combustível utilizado, e em como evitá-la.

No caso particular da turfa, a composição dos gases queimados é a seguinte: CO_2 , N_2 , NO_x , H_2O (vapor), CO e SO_2 .

No que se refere à saúde e à ecologia, tanto o CO_2 , o N_2 como o H_2O são gases que não causam problemas, pois não são poluentes, tóxicos ou corrosivos. O CO formado normalmente nos combustores comuns, e que é substância nociva ao homem, pode ser considerado inexistente, já que a redução do carbono em leito fluidizado dá-se de forma completa, originando somente CO_2 .

No caso do leito operando à temperatura de 850°C, não existem condições para a formação de NO_x em quantidades que justifiquem qualquer cuidado nesse aspecto.

A composição da turfa utilizada revela uma pequena porcentagem em peso de enxôfre (0,7%).

Assim, não devemos esperar grandes problemas, devido à baixa quantidade de SO_2 que será lançada na atmosfera.

Caso a composição da turfa usada venha a apresentar altos teores de enxôfre, existem dois métodos para controlar a emissão de SO_2 na atmosfera que se baseiam na adição de carbonato de sódio ativo ou de carbonato de cálcio, produzindo respectivamente sulfato de sódio e sulfato de cálcio.

Tais reagentes são adicionados ao leito em proporções calculáveis e podem ser removidos juntamente com as cinzas.

Podemos concluir que a queima da turfa em leito fluidizado apresenta vantagens no que tange à emissão de gases tóxicos ou poluentes, requerendo apenas o uso do ciclone para remoção de partículas.

11. PERDA DE CARGA NO EQUIPAMENTO

A perda de carga no equipamento pode ser calculada por etapas e podemos classificá-las em localizadas e distribuídas.

Já foi dada atenção especial à perda de carga no leito fluidizado porque seu equacionamento foge aos padrões normais, dadas as condições especiais em que ocorre a passagem dos gases.

Vejamos agora as outras formas de perda de carga:

1 - Perda de carga localizada (ΔP_k)

A grelha ou distribuidor do nosso equipamento será feita de acordo com a orientação do professor Hildo Pera.

Será constituída de uma chapa de uma polegada perfurada, cuja secção livre corresponde a 25% da área da chapa. Por esses furos na chapa são passados tubos com diâmetros interno de 3/8", cuja altura para cima da chapa dentro do leito é de 35 mm fechados no extremo superior.

Na altura de 25 mm acima da chapa são feitos dois furos de 1/4" diametralmente opostos, de tal forma que o ar insuflado seja lançado transversalmente ao eixo do leito.

Observamos que não ocorre ataque da grelha pelo calor pois esta é constantemente resfriada pelo ar.

Além disso, quando o leito estiver fluidizado, restará sobre a grelha uma camada de 20 mm de areia que funcionará como refratário.

Assim, a perda de carga localizada na grelha é estimada em:

$$V = \frac{V_{ar}^r \cdot B \cdot 4}{0,25 \cdot D^2 \cdot 3600} = \frac{4,12 \cdot 95,02 \cdot 4}{0,25 \cdot 0,32 \cdot 3600} = 5,4 \text{ m/s}$$

K = coeficiente experimental de perda de carga localizada
 = 3,0 (adotado)

$$P_k = K \frac{V^2}{2g} = 3,0 \cdot \frac{5,4^2}{2 \cdot 9,8} = 0,05 \text{ Kgf/cm}^2$$

As demais perdas localizadas serão englobadas como comprimento equivalente no próximo ítem.

2 - Perda de Carga Distribuída

Ocorre na tubulação do equipamento, é expressa por:

$$P = 0,4 f \frac{L}{D^{1,22}} V^{1,82}$$

$$L = \left(\begin{array}{l} \text{comprimento estimado} \\ \text{da tubulação} \end{array} \right) = 3,5 \text{ m}$$

$$D = \text{diâmetro} = 0,15 \text{ m}$$

$$f = \text{fator de perda de carga para tubos lisos} = 0,9$$

V = velocidade do ar no interior dos tubos

$$V = \frac{V_{\text{ar}}^r \cdot 4}{0^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 4,12 \cdot 95,02}{0,15^2 \cdot 3600} = 6,15 \text{ m/s}$$

$$P_d = 0,4 \cdot 0,9 \cdot \frac{3,5}{15^{1,22}} \cdot 6,15^{1,82} = 1,26 \text{ Kgf/cm}^2$$

3 - Perda de Carga no Leito Fluidizado

Conforme calculado anteriormente

$$P_1 = 2,0 \text{ Kgf/cm}^2$$

4 - Perda de Carga no Ciclone

Conforme veremos adiante, o ciclone utilizado para limpeza dos gases introduz uma perda de carga igual a

$$P_c = 60 \text{ mm C A} = 0,06 \text{ Kgf / cm}^2$$

5 - Perda de Carga Total

É igual à soma das perdas de carga ao longo de todo equipamento, e é igual a

$$P = \Delta P_k + \Delta P_d + \Delta P_1 + \Delta P_c$$

$$P = 0,05 + 1,26 + 2,00 + 0,06$$

$$\Delta P = 3,37 \text{ Kgf / cm}^2$$

Assumindo um coeficiente de segurança $s = 1,2$

$$\Delta P = 4,0 \text{ Kgf / cm}^2$$

Portanto, devemos ter um conjunto de ventilação que forneça:

$$P = 4,0 \text{ Kgf / cm}^2 \quad e$$

$$Q = 0,109 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

12. PARTIDA E ALIMENTAÇÃO

Para conseguirmos dar início ao processo de combustão da turfa, é necessário que elevemos a temperatura do leito a um valor próximo daquele em que o mesmo deverá funcionar.

É necessário então, que utilizemos um segundo combustível para dar partida no combustor. O combustível mais adequado, cujo uso já foi aprovado por diversas experiências (1) é o gás propano. A injeção do gás no leito pode ser feita tanto na câmara plenum como imediatamente sobre a grelha, sendo que em nosso caso, optaremos por esta segunda configuração.

A ignição do gás se dá através de uma chama piloto, imediatamente acima do leito.

Podemos esperar que o leito não levará mais do que 15 minutos para passar da temperatura ambiente e uma temperatura de 300°C, quando então a turfa começará a ser introduzida no leito.

Para garantir a continuidade do processo de ignição, o fornecimento de gás só deverá cessar quando o leito tiver atingido a temperatura de 700°C.

A partir desse instante a turfa será capaz de manter o processo, sem que haja riscos de sua interrupção.

O gás oferece a vantagem de ser facilmente transportado e manuseado, e requer apenas um conjunto de regulador, válvula e rotâmetro para o controle de fluxo.

Para alimentar o leito fluidizado com a turfa, o equipamento mais adequado a esse tipo de material é o transportador de parafuso helicoidal (norma DIN 15261), que levará a turfa do seu depósito

até a entrada no leito fluidizado logo acima da grelha.

Sendo este um equipamento que, embora simples, é de difícil fabricação, não vamos defini-lo, sugerindo a compra de um transportador já existente no mercado.

Lembramos que a seleção do equipamento deverá considerar fatores tais como: tamanho dos grãos, tendência ao empelotamento, existência de fibras, umidade, temperatura e ação corrosiva.

13. INSTRUMENTAÇÃO E CONTRÔLE

Sendo este projeto um trabalho a nível experimental, é de grande importância que tenhamos informações precisas sobre as condições de temperatura e pressão no leito fluidizado, bem como nos demais pontos do equipamento. Os resultados obtidos do seu funcionamento é que nos permitirão avaliar a validade das hipóteses formuladas.

a) Registro da Perda de Carga

A pressão deve ser tomada de modo a melhor demonstrar pontos ou regiões de maior perda de carga dos gases ao longo do equipamento. Colocaremos medidores de pressão nos seguintes pontos:

- Na câmara plenum, situada debaixo da grelha
- Logo acima do leito de pedras
- Logo acima do leito fluidizado
- Na entrada do ciclone
- Na saída do ciclone

b) Registro da Temperatura dos Gases

O equipamento mais adequado para este tipo de registro é o termopar de Cromel-Alumel (tipo K), cuja faixa de operação se estende desde 0 até 1200°C e cujo custo não é excessivo.

Estes termopares devem ser colocados:

- No meio do leito
- No meio da câmara acima do leito
- Na entrada do ciclone
- Na saída para a atmosfera

Seria extremamente interessante que utilizássemos um registrador gráfico que forneça a temperatura desses pontos^c durante a operação do leito fluidizado, permitindo uma posterior análise dessas informações, objetivando a melhora do projeto.

14. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Podemos dizer que o processo de combustão em leito fluidizado, embora não seja muito recente, não teve até hoje interesse prático.

À medida que as fontes de energia se tornam escassas, a necessidade de melhorarmos a eficiência da combustão se torna imediata. No Brasil, pouco tem sido estudado a respeito deste processo e talvez seja esta a razão da quase total inexistência de bibliografia sobre o processo de combustão em leito fluidizado.

De igual forma, somente agora começam a surgir estudos a respeito da turfa e do seu aproveitamento para geração de energia, o que prejudica bastante o projeto de equipamentos que pretendam utilizá-la como combustível.

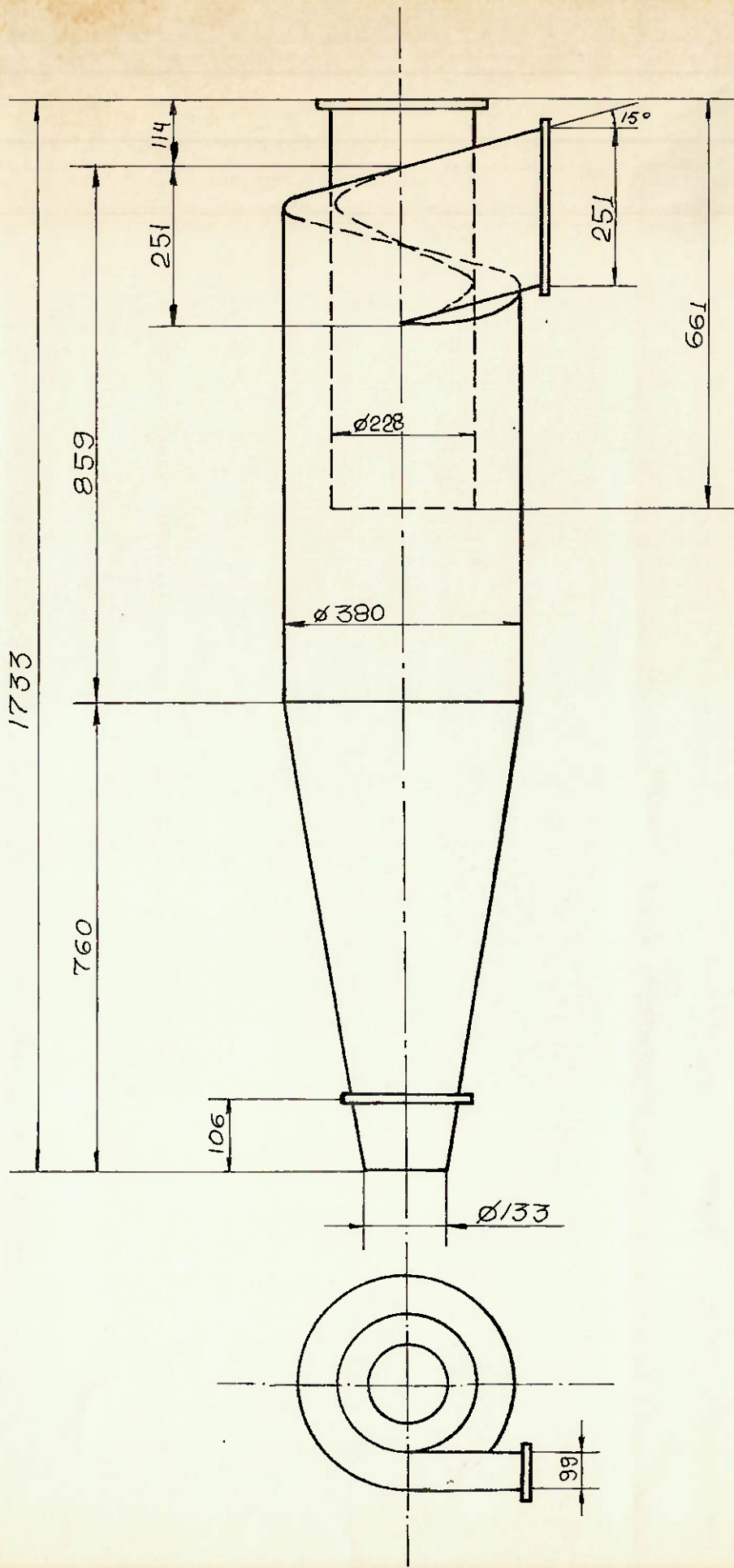
Procuramos vencer esses obstáculos no decorrer deste trabalho que, esperamos, venha a confirmar a base teórica na qual foi fundado, e a permitir um avanço no conhecimento deste processo que se presta aos mais variados tipos de combustíveis.

Estamos certos de que o combustor de leito fluidizado, em pouco tempo terá seu uso difundido na forma de pequenas e médias instalações, principalmente nos meios rurais onde são vários os materiais que poderão ser boa fonte de energia neste tipo de combustor.

BIBLIOGRAFIA

1. DAVIDSON, J.F.; KEARNS, D.L. - Fluidization, Proceedings of the Second Engineering Foundation Conference, 1978 - Cambridge University Press.
2. ZABRODSKY, S.S. - Hydrodynamics and Heat Transfer in Fluidized Beds - Massachussets Institute of Technology.
3. MILLER, C.O.; LOGWINNK, A.K. - Ind. Eng. Chem., s.l., 43: 1220-6, 1951.
4. LEVA, Max - Fluidization - McGraw-Hill Book Company - 1959.
5. PERA, H. - Geradores de Vapor D'água (caldeiras) - Departamento de Engenharia Mecânica - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
6. NECATI "ÖZISIK, M. - Basic Heat Transfer - Tokio - McGraw-Hill, Kogakusha, 1977.
7. SILVA, Remy Benedito - Ventilação - Depto. de Livros e Publicações do Grêmio Politécnico da USP, 1978.
8. GORDON, G; PEISAKHOV, L. - Dust Collection and Gas Cleaning - Mir Publishers Moskow, 1972.
9. KREITH, Frank - Princípios da Transmissão de Calor - Editôra Edgard Blücher Ltda, 1977.
10. SILVA, Remy Benedicto - Manual de Termodinâmica e Transmissão de Calor - Depto. de Livros e Publicações do Grêmio Politécnico da USP, 1980.





CICLONE RENATO P.P. DIAS	PMC-519
	8-12-84
	ESCALA 1:10