

1773
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

QUEIMA DA TURFA EM COMBUSTORES

PELO PROCESSO DO LEITO FLUIDIZADO

(Parte I)

Aluno: Georg Richard Elster

Orientador: Prof. Hildo Pera

Ano: 1983

ÍNDICE

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	TIPOS CONHECIDOS DE TURFAS BRASILEIRAS	3
3.	A QUESTÃO DA ELEVADA UMIDADE DA TURFA	7
4.	O PODER CALORÍFICO DAS TURFAS BRASILEIRAS ...	8
5.	O PROCESSO DE COMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO.	10
6.	FORMULAÇÃO GERAL	11
7.	LIBERAÇÃO VOLÁTIL	19
8.	CINÉTICA DE OXIDAÇÃO DA PARTÍCULA DE COMBUS- TÍVEL DEVOLATILIZADA	22
9.	TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE EXCEDENTE	23
10.	EFICIÊNCIA DE COMBUSTÃO DO CARBONO	24
11.	FORMAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO E QUEIMA ...	25
12.	SUGESTÃO PARA ANÁLISE DA QUEIMA DA TURFA NO PROTÓTIPO DO COMBUSTOR	26
13.	COMENTÁRIOS FINAIS	28
	BIBLIOGRAFIA	29

SUMÁRIO

A crise energética mundial motivou uma série de estudos na busca de combustíveis alternativos, chegando-se a cogitar o emprego da turfa em escala industrial para fins energéticos no Brasil.

Tratando-se de um combustível de baixo poder calorífico, é de interesse estudar a sua queima em combustores de leito fluidizado, cujo processo tem dado bons resultados na queima de combustíveis que apresentam baixas eficiências de combustão quando queimados pelos métodos convencionais. O trabalho foi dividido em dois volumes. No primeiro são descritos a turfa brasileira quanto a vários aspectos que a tornam viável como recurso energético e o processo de combustão em combustores atmosféricos de leito fluidizado, indicando suas principais vantagens.

A bibliografia sobre o processo de combustão em leito fluidizado é porém bastante restrita e as experiências feitas até hoje parecem ter utilizado quase sempre carvão mineral para estudar os vários aspectos da combustão como: eficiência, emissão de monóxido de carbono e óxido nítrico, influência do tamanho da partícula de combustível alimentada, velocidade de fluidização, temperatura do leito, altura do leito, etc. Estes estudos porém dão uma orientação quanto aos parâmetros que mais influenciam o processo de combustão em combustores de leito fluidizado e

portanto são os que devem ser estudados quando for construído um combustor protótipo para queima da turfa, cuja orientação para projeto é dada no volume dois do presente trabalho.

1. INTRODUÇÃO

O relativo alto poder calorífico da turfa brasileira, igualando ou superando os carvões mais pobres do Sul, e seus teores de cinzas e de enxofre, geralmente sempre mais baixos do que estes, são fatores que ajudam a tornar viável aquele tipo de material como recurso energético brasileiro.

A ampla distribuição geográfica da turfa através do Brasil, e as grandes reservas geológicas são aspectos importantes que muito a valorizam, e servem para conduzi-la com naturalidade, a preencher a lacuna deixada pela falta de carvão fora da Região Sul.

É válido lembrar que o carvão mineral clássico pode ocorrer nas chamadas bacias sedimentares, que cobrem apenas 3,2 milhões de km². As turfás ao contrário, como têm formação atual e subatual, e são em muitos casos marginais às calhas hidrográficas, originam-se perfeitamente, até sobre o chamado embasamento cristalino. Isto significa que elas não exigem ambiente geológico específico para se originar e desenvolver. Daí a sua busca se estender sobre os 8,6 milhões de km² do território nacional.

Os estudos geológicos preliminares até agora efetuados em diversas regiões do país revelaram um grande potencial de reservas de material turfáceo, cuja relativa boa qualidade ajuda a mostrar que o Brasil dispõe de ilimitados recursos energéticos ainda inexplorados, espalhados por todos

os quadrantes de seu território. Cerca de 53 ocorrências distintas de turfa foram já reconhecidas no Brasil.

As novas e mais simplificadas técnicas de mineração e beneficiamento das turfeiras desenvolvidas fora do Brasil, com equipamentos não sofisticados e cuja fabricação é perfeitamente viável, de imediato, pela indústria nacional, podem garantir uma economia de lavra extrativa bem mais barata e vantajosa do que aquela usada na exploração do carvão do sul.

2. TIPOS CONHECIDOS DE TURFAS BRASILEIRAS

A) Quanto ao material original, três tipos distintos são encontrados:

1. Turfa de Microflora ou "Turfa Hídrica". Formada em ambiente aquoso ou subaquoso, dando uma espécie de "turfa sedimentar", à base de algas, pólenes, flores aquáticas, plânctons. Trata-se de uma "turfa fina" muito comum nas lagoas intracontinentais ligadas a cursos de rio ou em lagos mixohalinos represados atrás de restingas costeiras. Estes vários tipos de lagos contêm a "turfa lamacenta", depositada no fundo, e exigem dreno prévio ou sucção por bombas. No conjunto a turfa lamacenta é ainda conhecida como "vasa orgânica". Antigamente rotulada também como "sapropelito", pode ter cores escuras a esverdeadas, que se oxida ao ar.

2. "Turfa fibrosa" é a que ocorre na superfície do terreno por acúmulos orgânicos, naturais ou plantados pelo homem. Compõem-se à base de fibras e filamentos pouco decompostos, imersos em matriz de aspecto gelatinoso ou subgranular. Tem cor escura ou marrom.

3. "Turfa lenhosa" formada pelos vegetais de porte grande, à base de coníferas, arbustos e pinhos. No caso da Amazônia é evidente que as "turfas lenhosas"

provêm de outras espécies vegetais que não as citadas acima.

Forma-se na superfície do terreno. Tem textura granular. Chega a preservar fragmentos de lenho apodrecido ou decomposto. Torna-se solta após a secagem. A sua coloração "in situ" é função do grau de humificação e do tipo de material vegetal colmatado, pode ser preta ou cinza.

B) Quanto ao aspecto "in natura":

1 - "Turfeiras lamacentas" quando o material orgânico carbonoso está em "suspensão densa" em determinados meios aquosos restritos. Neste caso podem ser empiricamente denominadas de "LAMAS ORGÂNICAS" ou de "TURFEIRAS HÍDRICAS".

2 - "Turfeiras secas" quando foram naturalmente drenadas, ou quando já se desenvolveram desde o início sobre terrenos elevados hidrófilos, apenas encharcados com periodicidade.

Podem também, neste caso, serem chamadas de TURFEIRAS SOLIDIFICADAS OU COMPACTADAS.

3 - "Turfeiras litificadas" quando já ocorrem fora do "habitat" geológico do recente. Neste caso elas se apresentam inteiramente SECAS, seu aspecto é estratificado com nitidez, denunciando até certo zoneamento geológico natural do material orgânico, já passando a litificado.

Este tipo de material pode também ser denominado de

TURFA ou TURFEIRA LINHITIZADA porque mostra já o primeiro estágio de formação do LINHITO.

C) Quanto ao ambiente geológico de origem:

As turfeiras, de onde provêm as turfas, para que possam se formar, dependem de um meio hídrico ou aquoso permanente ou sazonal. Este ambiente aquoso tem de ser de água doce ou, no máximo, mixohalina. Raros são os casos conhecidos de turfeiras desenvolvidas sob controle marinho de água salgada, neste caso, junto ou próximo à linha de costa.

Não foi ainda detectado este último tipo de turfeira "marinha ou de transição" no Brasil.

Levando em conta esta explicação, os tipos de turfas e turfeiras, quanto a este item são os seguintes:

1. Turfeiras fluviatiles interioranas
2. Idem, límnicas
3. Idem, paleodeltaicas
4. Idem, meso-marinhas costeiras.

D) Quanto ao meio ecológico atual:

Hã aqui a necessidade de se considerar dois tipos principais de turfas. São eles:

1 - Turfas naturais, quando se desenvolvem normalmente sem interferência da mão do homem. Formam as assim chamadas "turfeiras geológicas".

2 - Turfas "antrópicas" quando, direta ou indiretamente, formaram ou modificaram suas características de desen-

volvimento às custas do homem.

E) Tipos de turfas quanto ao uso:

1. Turfas para fins industriais: carbono ativo, filtros, "black-carbon", "briquetes", etc.
2. Idem, energético. Compreendendo 3 ou 4 subtipos.
3. Idem, agrícola. Com vários subtipos. Inclusive com variedade anti-agrícola.
4. Idem, para gaseificação.

3. A QUESTÃO DA ELEVADA UMIDADE DA TURFA

Conforme o caso, após o dreno natural provocado nas turfeiras para facilitar a lavra mecanizada, o emprego de simples equipamentos de compressão, concomitante à extração do material já reduz, muitas vezes, o volume de água da turfa ao nível desejado, quando não houver outros tipos de equipamentos simples que, acoplados ao principal, e aquecidos pela própria turfa, reduzem a umidade natural desta finalidade desejada.

4. O PODER CALORÍFICO DAS "TURFAS BRASILEIRAS"

Estudos comparativos já levados a efeito nos últimos tempos entre o poder calorífico das turfas escandinavas e brasileiras, mostraram que as médias mais elevadas ficam com o material turfáceo do Brasil, de uma maneira geral.

Em verdade, só agora, nos últimos 5 a 6 anos é que foram retomados os estudos das TURFAS BRASILEIRAS. Os dados existentes são poucos e permitem apenas conclusões incipientes.

O que existe é suficiente, no entanto, para que se possa considerar, em princípio, serem as turfeiras, originadas em condições tropicais úmidas, as que exibem poder calorífico maior, quando comparadas às outras, desenvolvidas em climas frios.

Tudo indica que as turfas provenientes de ALGAS e vegetais aquáticos, abundantes nos climas quentes e super-úmidos, apresentam um teor de carbono e um tipo de material orgânico capaz de proporcionar um poder calorífico mais alto que materiais semelhantes, originados principalmente às expensas das folhas e caules de vegetais gigantes.

A média geral do poder calorífico superior para o conjunto das áreas turfeiras de São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo é da ordem de 4.120 Kcal/kg.

Convém esclarecer também que o poder calorífico de uma turfeira varia dentro dela mesma, mostrando-se em zoneamento horizontal e vertical. Daí então a necessidade de se estabelecer para cada área turfácea os limites dos locais onde o poder calorífico é maior.

O estudo estatístico dos dados disponíveis sobre o assunto mostra com facilidade, no entanto, que o poder calorífico superior das turfas nacionais é, de uma maneira geral, mais elevado que os "carvões pobres" do Sul, cuja média se situa em torno de 3.100 a 3.200 Kcal/kg, o que constitui um fator de grande importância em prol da defesa da turfa brasileira, como combustível de uso imediato e compensador em termos de balanço energético.

Apesar de registros de turfeiras que mostram Poder Calorífico Superior (PCS) bem acima da média geral, a turfa é um combustível de baixo poder calorífico e, com isso, deve-se optar por um processo de queima de elevada eficiência, como é o caso da combustão em leito fluidizado.

5. O PROCESSO DE COMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO

Algumas das vantagens que a combustão em leito fluidizado oferece em relação à queima dos vários tipos de combustíveis são

as altas taxas volumétricas médias de liberação de energia,
a flexibilidade de utilização de combustíveis de qualidade variável,

a capacidade de dessulfurização dos produtos de combustão durante o processo,

a possibilidade de operação em baixas temperaturas, relativamente aos outros processos de queima, com o consequente benefício da redução da vaporização de elementos potencialmente tóxicos e da eliminação da aglomeração de cinzas devido à fusão parcial.

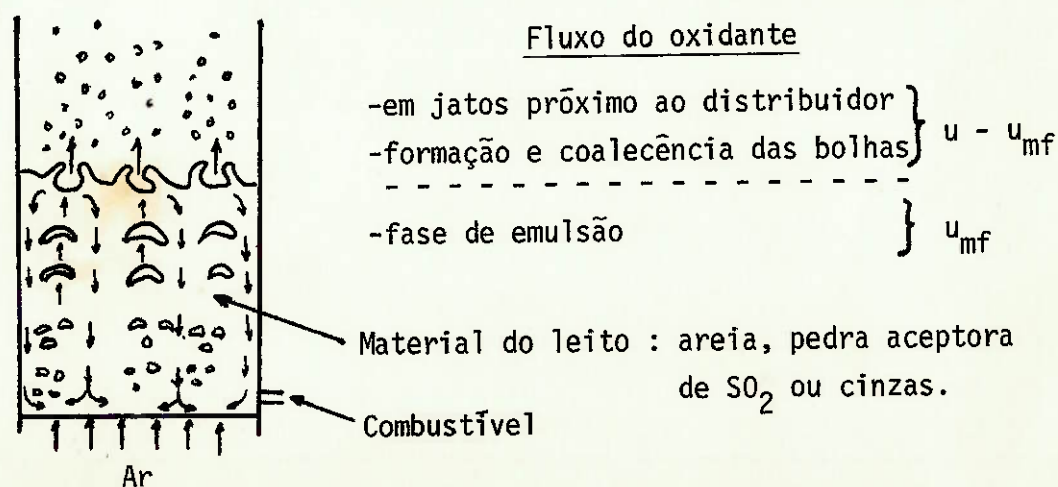


Fig.1 : Processos que ocorrem em um combustor de leito fluidizado.

O processo que ocorre em um combustor de leito fluidizado é mostrado esquematicamente na Figura 1. O ar de fluidização passa através da placa de distribuição perfurada. Parte do ar passa através de interstícios entre as partículas e o restante forma bolhas que crescem por coalescência enquanto fluem através do leito. O material do leito consiste principalmente de cinzas inertes, pedra acceptora de SO_2 (geralmente dolomita ou calcáreo) ou mesmo areia. O combustível é alimentado através de uma série de pontos de alimentação e é rapidamente dispersado através do leito enquanto queima. Em alguns combustores a temperatura do leito é controlada através de trocadores de calor imersos. Alguns dos sólidos respingam na parte superior livre acima do leito fluidizado quando as bolhas estouram e são elutriados com os produtos da combustão, mas a maior parte da remoção dos sólidos do leito ocorre através de veios de transbordamento ou tubos. De maneira a aumentar a eficiência da combustão de carbono, uma parte do material particulado combustível elutriado do leito é coletado em um ciclone e é reinjetada no leito ou queimada em um leito em separado, operado com velocidade de fluidização menor e temperatura mais alta.

Os aspectos diferenciadores dos combustores de leito fluidizado são:

- a) A circulação de sólidos no interior do leito é rápida em relação à oxidação do carbono e às velocidades de

reação de absorção de SO_2 . A consequência disto é que os sólidos podem ser tratados como sendo bem misturados.

b) A temperatura do leito é relativamente uniforme e independentemente controlável.

c) O teor de carbono nos sólidos do leito é pequena, tipicamente 0,1 a 1,0 por cento em peso; um corolário é que a mecânica dos fluidos é determinada pelo tamanho das partículas que formam o material do leito e não pelo tamanho das partículas de combustível alimentado.

Primordial em qualquer modelo de combustão em leito fluidizado é a previsão do carregamento de combustível no leito, cujo valor determina a perda de combustíveis do leito por elutriação e transbordamento, o índice de formação de monóxido de carbono no leito e o nível de emissão de NO. O carregamento de combustível é determinado por um equilíbrio entre a taxa de alimentação de combustível e o consumo de combustível por oxidação e por perda através de elutriação e transbordamento.

6. FORMULAÇÃO GERAL

O carregamento de combustível no leito pode ser determinado com base no balanço da população de partículas de carbono, uma lei de queima para cada uma das partículas e um levantamento das espécies reagentes.

A maioria dos modelos de combustores de leito fluidizado supõe que o combustível é devolatilizado instantaneamente, o que se revela uma hipótese válida para fins de cômputo do carregamento de combustível. Supõe-se que os sólidos estejam bem misturados uma vez que o tempo característico de circulação dos sólidos é pequeno em relação ao tempo de queima.

Segundo Kunii e Levenspiel, o balanço populacional das partículas numa faixa de tamanho de R até $R + dR$ é dado por,

$$F_o \cdot p_o(R) = F_1 p_1(R) + W k(R) p_1(R) +$$

entrada transbor- elutriação
 damento

$$W \frac{d}{dR} p_1(R) \cdot \frac{dR}{dt} - \frac{3W}{R} \cdot p_1(R) \frac{dR}{dt}$$

Variação líquida devido à diminuição da partícula

onde

F_o = taxa de alimentação em massa de combustível

F_1 = taxa de retirada de sólidos

p_o = fração da alimentação de combustível, em massa,
na faixa de tamanho R a $R + dR$

p_1 = fração da massa de combustível no leito na faixa de tamanho R a $R + dR$

W = peso do combustível no leito

k = constante de elutriação, taxa, em massa, do transporte do combustível na faixa de tamanho R a $R + dR$ por unidade de massa de combustível no leito.

O modelo utilizado na formulação acima para a combustão do combustível é o da densidade constante (esfera que encolhe). O valor dR/dt é o valor da taxa de encolhimento devido à combustão, mas também tem sido utilizado para incluir o efeito de atrito.

A teoria de duas fases de fluidização de Davidson e Harrison fornece a base para o balanço de massa sobre o oxidante. A principal hipótese desta teoria é que a taxa do fluxo de gás se divide em duas partes, uma fluindo através dos interstícios das partículas da fase particulada (ou de emulsão) numa velocidade mínima de fluidização e a outra, isto é, o fluxo excedente fluindo na forma de bolhas através do leito. Numa versão simples do modelo supõe-se que a reação de oxidação de combustível ocorra inteiramente na fase de emulsão até a sua conclusão (produto CO_2). Supõe-se também que o gás na fase de emulsão esteja bem misturado (numa concentração C_p), uma vez que os sólidos são substancialmente segregados nesta fase.

A variação com a altura da concentração C_p de oxigênio na fase de bolha é dada por

$$\mu_b \cdot \frac{dc_b}{dh} = K_{bp} (C_b - C_p)$$

Variação de oxigênio
nas bolhas

Transferência de oxigênio entre
bolhas e emulsão

onde K_{bp} é o coeficiente de troca entre a bolha e a emulsão e μ_b a velocidade da bolha. A aplicação do modelo acima fornece o índice molal total de consumo de oxigênio para um leito de área transversal A_o e altura h_T através de

$$\dot{m}_{O_2} = A_o (C_o - C_p) \left[(1 - f) \mu_{mf} + f \cdot \mu_b \cdot (1 - e^{-K_{bp} h_T / \mu_b}) \right]$$

oxigênio da
fase de
emulsão
oxigênio escapando através
da bolha

Demonstra-se que f , a fração do gás atravessando o leito na fase de bolha, pode ser escrito como

$$f = (\mu_o - \mu_{mf}) / (\mu_b - \mu_{mf})$$

onde

μ_o = velocidade superficial do gás

μ_{mf} = velocidade mínima de fluidização

μ_b = velocidade do gás na fase de bolha

O fator $K_{bp} \cdot h_T / \mu_b$ indica o número de vezes, durante a passagem através do leito, que o volume da bolha é empurrado para fora pela troca entre a bolha e a emulsão.

A correlação entre o índice de consumo de oxigênio e o índice de consumo de carbono é

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{3W}{12} \int_0^{R_{\max}} \frac{p_1(R)}{R} \frac{dR}{dt} dR$$

onde

W = peso de combustível no leito

p_1 = fração de massa de combustível no leito na faixa de tamanho de R a $R + dR$

R = raio da partícula de combustível

$\frac{dR}{dt}$ = taxa de encolhimento devido à combustão

A equação anterior mostra que o carregamento de carbono no leito é determinado pelo produto do índice de combustão (medido pelo índice de consumo de oxigênio) e uma média ponderada do tempo de combustão da partícula (conforme dada pela recíproca da integral). As variações das formulações acima que tem sido utilizadas na modelagem de combustores de leito fluidizado incluem uma margem para:

- a) perfis de concentração na fase de emulsão,
- b) distribuições de temperatura na fase de emulsão,
- c) formação e queima de CO ,
- d) resistência cinética na formulação de $\frac{dR}{dt}$.

Existem alguns casos simples em que uma solução analítica foi possível.

Para uma alimentação de combustível de raio R_1 num leito fluidizado bem misturado de um combustor, a distribuição do tamanho de partícula das partículas na fase de emulsão é dada por

$$p_1(R) = \frac{F_o}{W \left(\frac{dR}{dt} \right)} \cdot \frac{R^3}{R_1^3} \exp \left[- \int_{R_1}^R \frac{F_1/W + K}{\frac{dR}{dt}} dR \right]$$

Relembrando que

F_o = índice de alimentação em massa do combustível

Para o caso em que a retirada de sólidos F_1 e o índice de elutriação K são zero, a fração de massa $p_1(R)$ na faixa de tamanho R a $R + dR$ aumenta na proporção R^4 para uma reação controlada de transferência de massa, isto é, no caso em que $dR/dt \approx D.C_p/R$.

Substituindo na equação anterior os valores para as condições acima temos:

$$p_1(R) = \frac{F_o \cdot R^3 \cdot R}{W.D.C_p.R_1^3} = \frac{F_o}{W.D.C_p.R_1^3} \cdot R^4$$

onde

D = difusibilidade molecular

Analogamente para uma velocidade de reação quimicamente controlada quando $dR/dt = K C_p$ (K = velocidade de reação efetiva entre o oxigênio e a superfície da partícula constante), a fração de massa $p_1(R)$ na faixa de tamanho R a $R + dR$, aumenta na proporção de R^3 .

O conhecimento da população de partículas menores é importante para fins de avaliação da perda de carbono do leito por elutriação.

Um item importante que é necessário estabelecer é a principal resistência que controla a reação carbono-oxigênio para condições de interesse em combustores de leito fluidizado.

Com esta finalidade o comportamento de uma partícula expos
ta às temperaturas e às concentrações de oxigênio represen
tativas da fase de emulsão de combustores de leito fluidi-
zado foi examinado detalhadamente por vários pesquisadores.

(Ref. 5)

7. LIBERAÇÃO VOLÁTIL

A liberação volátil geralmente tem sido negligenciada ou é suposta infinitamente rápida em modelos de combustores de leite fluidizado.

A validade desta suposição pode ser verificada ao se analisar, por exemplo, a oxidação do combustível modelada para a reação de uma linhita porosa, ou seja, um estágio de formação após o da turfa.

Os resultados da simulação das reações concorrentes de oxidação dos voláteis e da partícula de combustível devolatilizado podem ser encontrados nas figuras 2 e 3. Na figura 2 a fração não queimada de voláteis e de combustível devolatilizado são traçados em função do tempo para uma partícula de 3 mm exposta a uma concentração de oxigênio de 8% e a temperaturas de 1023 e 1323 K. Noventa por cento dos voláteis são liberados nos tempos de 10 e 3 s respectivamente. Os tempos para devolatilização são aproximadamente duas ordens de magnitude mais baixos do que os tempos de queima da partícula devolatilizada de combustível correspondente. Os tempos para combustão volátil são portanto suficientemente pequenos para que a premissa de devolatilização instantânea não influencie o cálculo dos tempos de queima da partícula de combustível.

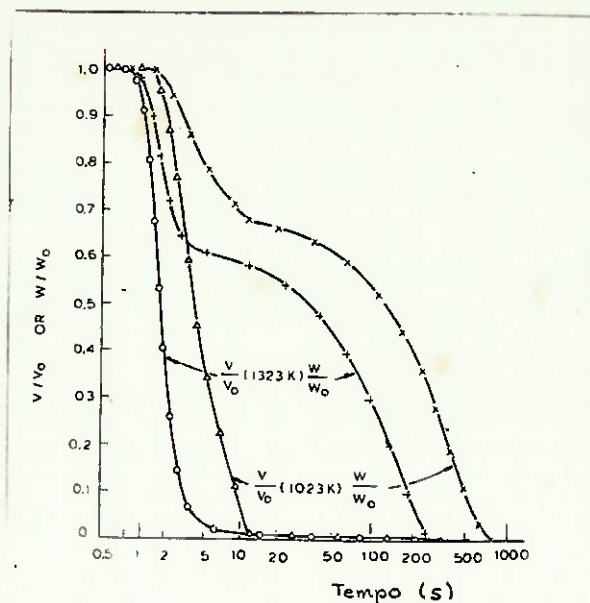


Fig. 2: Registros de queima e devolatilização de partículas com ignição de voláteis: R = raio da partícula= 0,15 cm; CO_2 = 0,08 atm (Ref. 5)

Os tempos de liberação volátil, entretanto, são maiores do que os tempos de circulação de sólidos e portanto a liberação volátil será distribuída por todo o leito fluidizado. Informações detalhadas desta partícula simulada - densidade da partícula, porosidade, temperatura de superfície, concentração de oxigênio superficial e raio da chama são apresentados na figura 3.

Leva cerca de 1/2 segundo para que a partícula seja aquecida às temperaturas nas quais a devolatilização se torna importante. A devolatilização rápida ocorre de 0,5 a 6,0 s, à uma taxa suficientemente rápida para produzir uma chama destacada da partícula. A partícula de combustível devolatilizada residual queima de 6,0 a 300 s como uma esfera de densidade aproximadamente constante.

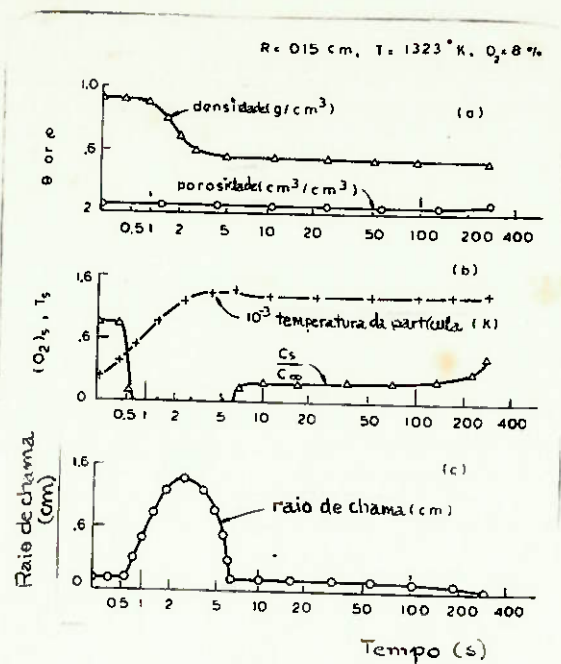


Fig. 3: Comportamento transitório da densidade, porosidade, temperatura da partícula, concentração de oxigênio superficial C_s em função da concentração de oxigênio ambiente C_∞ e raio da chama (escala de tempo $\log(t + 1)$). Da ref. 5.

A concentração de oxigênio na superfície é aproximadamente 30% do valor fora da camada limite indicando que, embora a difusão represente a maior resistência à oxidação, o termo de cinética superficial não é negligenciável.

8. CINÉTICA DE OXIDAÇÃO DA PARTÍCULA DE COMBUSTÍVEL DEVO-
LATILIZADA

Para a temperatura de maior interesse em combustores de leito fluidizado ($T = 1150K$) os tempos de queima passam de um regime limitado pela difusão para as grandes partículas a um regime controlado cineticamente para as pequenas partículas.

9. TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE EXCEDENTE

Espera-se que as temperaturas das partículas sejam mais elevadas do que as temperaturas médias do leito devido às reações exotérmicas em suas superfícies.

O excesso de temperatura, portanto, será importante perto da placa distribuidora onde a concentração de oxigênio é elevada, mas será pequena conforme as concentrações de gás se aproximarem dos valores de saída. O diferencial de temperatura entre a partícula e o gás irá aumentar com a diminuição do tamanho da partícula; isto portanto deveria ser levado em conta no cálculo do tempo de queima da partícula para as partículas menores em cujo caso a resistência cinética é uma fração grande do total.

O diferencial de temperatura entre a partícula em queima e os sólidos do leito aumenta com o aumento de temperatura primeiramente devido ao índice aumentado de reação, mas em temperaturas mais elevadas passa por um máximo, uma vez que o aumento no coeficiente de transferência de calor por radiação com temperatura torna-se efeito mais importante.

10. EFICIÊNCIA DE COMBUSTÃO DO CARBONO

A principal fonte de perda na combustão é a elutriação das partículas de carbono do leito. As fórmulas gerais apresentadas na seção 6 fornecem uma base para calcular a perda de carbono dos combustores de leito fluidizado. O valor de dR/dt pode ser computado por um modelo de esfera que encolhe de combustão de carbono, dando uma margem tanto para a difusão externa quanto para cinética química na temperatura local da partícula. Além disso os parâmetros mecânicos do fluido devem ser definidos. Infelizmente, muitos dos dados sobre leitos fluidizados foram obtidos de partículas catalizadoras que são tipicamente uma ordem de grandeza menor do que as partículas nos combustores de leito fluidizado. Por causa do efeito significativo do tamanho da partícula sobre o regime de fluxo há incerteza quanto à seleção dos parâmetros mecânicos do fluido necessários num modelo de leito fluidizado. Na literatura sobre a fluidização muitas das correlações propostas são experimentais e seria interessante testar sua aplicabilidade no caso da turfa.

11. FORMAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO E QUEIMA

À temperaturas relativamente baixas de operação dos combustores de leito fluidizado há um potencial para emissões inaceitavelmente elevadas de monóxido de carbono.

Os aumentos rápidos nas emissões de combustores de leito fluidizado de pequena escala foram observados quando a temperatura do leito foi reduzida, com a temperatura de transição variando na faixa de 950 a 1050 K.

A motivação para modelar a formação de monóxido de carbono e reações de queima é ao mesmo tempo a necessidade de estabelecer as condições nas quais as emissões de CO podem se tornar um problema e também a necessidade de determinar a concentração de CO no interior do leito de forma a modelar a redução catalítica de NO no interior de leitos fluidizados.

Os modelos para produção de CO no interior do leito foram baseados na suposição de que CO é o produto primário da reação $C + O_2$, e que o CO é subsequentemente queimado por reação homogênea tanto dentro da fase de emulsão como no interior das bolhas.

Há a necessidade também de medidas das concentrações de CO - tanto nas fases de emulsão e de bolha de forma a testar modelos de forma crítica. Espera-se que as concentrações de CO sejam mais elevadas na fase de emulsão do que na fase de bolha.

12. SUGESTÃO PARA ANÁLISE DA QUEIMA DA TURFA NO PROTÓTIPO DO COMBUSTOR

Antes de iniciar a queima da turfa no protótipo do combustor deve-se analisá-la para se ter uma idéia de sua composição química de modo a poder avaliar corretamente os resultados práticos.

Um item importante que deveria ser acrescentado à instrumentação seria um analisador da concentração de oxigênio nos gases de saída. Seria interessante que esta medição ocorresse continuamente através de, por exemplo, um analisador paramagnético aproveitando as propriedades paramagnéticas das moléculas de O_2 . Fixando-se as outras variáveis, ensaiando-se a uma dada velocidade de fluidização, pode-se alterar a taxa de alimentação turfa/ar e verificar a influência.

Devido à elutriação dos finos de combustível esta taxa de entrada não é adequada para representar o índice de combustão de cada ensaio. Uma variável mais adequada é a concentração de oxigênio nos gases de saída. Um balanço de oxigênio sobre o combustor fluidizado baseado neste valor dá o índice de fluxo de combustível efetivamente queimado.

A carga de carbono no leito W para cada ensaio é determinada com base em um valor médio da fração em massa de combustível em relação ao material do leito de amostras retiradas do leito quando em regime permanente.

existe uma relação entre W e $O_2\%$ para diferentes conjuntos de condições experimentais (Ref. 6). Para um dado índice de fluxo de ar a diminuição da concentração de oxigênio no gás de saída é representativa de um aumento no índice de fluxo de combustível queimado implicando uma diminuição mais ou menos semelhante na fase particulada do leito onde a combustão ocorre. Entretanto, esta redução sozinha diminuiria o índice de combustão para a difusão de gás ao redor das partículas e a reação química superficial que controla o processo global de queima. Na verdade, o índice de combustão aumenta porque o sistema de reação ajusta-se a um valor mais elevado de superfície de partícula de carvão exposta ao oxigênio, isto é, a uma carga de combustível maior no leito.

A presença de obstáculos resulta num aumento da carga de combustível porque há provavelmente uma maior tendência a que as bolhas coalem e subam mais rápido (Ref.6).

As concentrações de oxigênio deveriam ser ocasionalmente determinadas à saída do leito para avaliar a extensão de pós-queima no espaço livre acima do leito fluidizado. As temperaturas podem ser medidas por termopares em diferentes pontos do combustor.

13. COMENTÁRIOS FINAIS

O procedimento de cálculo pela estimativa do carregamento de combustível foram relativamente bem estabelecidos mas sua capacidade de previsão é limitada à disponibilidade de dados adequados primeiramente sobre os parâmetros mecânicos do fluido e em segundo lugar sobre a cinética da queima do carbono. Até mesmo com suas limitações atuais, entretanto, os modelos dão estimativas razoavelmente boas do carregamento de combustível (Ref.5), e podem ser usados para determinar os efeitos de mudanças de temperatura, tamanho de partícula, velocidade de fluidização e ar excedente.

Uma deficiência importante dos modelos atualmente disponíveis é sua incapacidade de prever a circulação de sólidos cuja consideração é necessária para a previsão de pontos quentes, zonas de redução local e localização ótima de pontos de alimentação.

BIBLIOGRAFIA

1. EKONO CONSULT. ENGINEERS, Classification and properties of peat for fuel purposes.
Helsinki, Ekono CE., 1980. 30 p. tab Graf.
2. YIP, H.H. & ENGSTROM, F, Peat Combustion in a circulating fluid bed.
In: International Peat Congress, 6. Duluth, Minn.
(Aug.17-23, 1980)
3. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Brasil).
Turfa: o novo combustível nacional.
RJ. CPRM, 1980 (Turfa, Monografia nº1)
4. Symposium of Commission II on Combustion of Peat
Proceedings.
Kuopio, Finland; Sept. 23-26, 1975.
5. SAROFIM, ADEL F., BEÉR, JANOS M.,
Modelling of Fluidized Bed Combustion
Combustion, 1980, págs. 189-204
6. DONSI G., MASSIMILA L., RUSSO G., STECCONI P.
Carbon Load and Gas Composition in Fluidized Bed
Combustion
Combustion, 1980, págs. 205-210.

7. PERRY
Chemical Handbook
8. KUNII & LEVENSPIEL
Fluidization Engineering
9. DAVIDSON & HARRISON
Fluidized Particles
Fluidization