

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Combustão fluidizada de carvão mineral e
combustíveis vegetais.

Por: Francisco José dos Santos

Orientadores:

Professor Raymond Burnyeat Peel

Professor Carlos Alberto Luengo

Trabalho apresentado à Comissão de
Pós-Graduação da Faculdade de Enge-
nharia de Campinas, como parte dos
requisitos para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Mecânica

CAMPINAS S.P. 1981.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Aos meus pais; Pedro e Aparecida,
e à minha esposa Márcia.

I N D I C E

	Página
Lista de Tabelas	vi
Lista de figuras	vii
Agradecimentos	x
Resumo	xi
I. INTRODUÇÃO	
a) Aspectos gerais	1
b) Fundamentos sobre leito fluidizado	2
c) Teoria das duas fases	6
d) Transferência de calor em leito fluidizado	7
e) Modelo de combustão	9
f) Vantagens e limitações da combustão fluidi- zada.	11
II. APARATO EXPERIMENTAL	
a) Cálculo do reator	13
b) Projeto da geometria do leito	15
c) Projeto da placa distribuidora	17
III. DESCRIÇÃO DOS REATORES E DEMAIS MONTAGENS EXPERIMENTAIS.	
a) Reator sem resfriamento, instrumentação e sistema de alimentação.	18
b) Reator com resfriamento a água	25

	Página
c) Modelo de vidro	27
d) Mini-leito de combustão fluidizada	27
e) Caracterização dos combustíveis	29
IV. METODOLOGIA DE TESTES	
a) Variação da concentração de carvão no leito	30
b) Testes de operação contínua para diferentes combustíveis.	33
c) Testes com variação do volume do leito	34
d) Testes de simulação a frio	35
e) Testes da taxa de aquecimento de partículas.	36
V. RESULTADOS E DISCUSSÃO	
a) Testes de combustão sem extração de calor do leito	38
a.1. Carvão mineral	44
a.2. Carvão vegetal ativado	55
a.3. Resíduos de carvão vegetal siderúrgico	61
a.4. Cavacos de madeira	64
a.5. Sabugo de milho	71
a.6. Bagaço de cana, casca de arroz e serra- gem.	74
b) Propriedades dos combustíveis vegetais	76
c) Testes da taxa de aquecimento de partículas.	81

	Página
d) Testes do reator com sistema extrator de calor.	85
e) Dados típicos da operação dos reatores	88
VI. CONCLUSÕES	90

LISTA DE TABELAS

TABELA	DISCRIMINAÇÃO
I	- Caracterização dos combustíveis
II	- Estudos comparativos de massa e volume necessários para gerar a mesma energia
III	- Resultados típicos de testes com carvão mineral.
IV	- Análise granulométrica e de conteúdo de carbono do material do leito, para testes com carvão mineral.

LISTA DE FIGURAS

Figura	Discriminação	Página
1	Gráfico da perda de carga no leito em função da taxa de escoamento.....	
2	Gráfico da variação do coeficiente de transferência de calor em função da taxa de fluidização.....	
3	Reator de combustão em leito fluidizado....	
4	Esquema do reator de combustão fluidizada, equipado com sistema extrator de calor.....	
5	Esquema do mini-leito.....	
6	Gráficos da distribuição de massa de combustível através do volume do leito.....	
7	Gráficos de: Temperatura X Tempo e de volume de gás(%) X Tempo.....	

Figura	Discriminação	Página
8	Gráficos de Temperatura X Tempo e de Volume de Gás(%) X Tempo.....	
9	Gráficos de: Temperatura X Tempo e de Volume de Gás(%) X Tempo.....	
10	Gráficos de: Temperatura X Tempo, Volume de Gás(%) X Tempo e da Concentração de Carbono no leite X Tempo.....	
11	Gráfico de: Temperatura X Tempo, Volume de Gás(%) X Tempo e da Concentração de Carbono no Leite X Tempo.....	
12	Gráficos de Temperatura X Tempo e de Volume de Gás(%) X Tempo.....	
13	Gráficos de: Temperatura X Tempo e de Volume de Gás(%) X Tempo.....	
14	Gráficos de Temperatura X Tempo e de Volume de Gás(%) X Tempo.....	

Figura	Discriminação	Página
15	Representação da queima de voláteis.....	
16	Gráficos da Temperatura no centro da partícula de Tempo; para sabugo de milho e cavaço de madeira.....	
17	Gráficos da Temperatura no centro da partícula X Tempo; para carvão vegetal siderúrgico e bloco cilíndrico de madeira.....	

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Raymond B. Peel e Carlos A. Luengo, pela orientação deste trabalho.

A Gerson J.S. Ciampi, Edson C. de Mello, Alberto J. Calandra, Giancarlo Parini, João L.M. da Silva e Rovilson Trevisan, pela ajuda na montagem e operação do reator.

A José L. Piazza, pelas análises cromatográficas.

A Nancy G. de Oliveira e Jeverson J.B. Barbieri pelos serviços de datilografia.

Aos amigos da Seção de Desenho do I.F.G.W.

A Champion S/A, Indústria de papel e celulose, pelas amostras de cavaco de madeira.

A ACESITA - Cia. Aços Especiais Itabira, pelo envio de amostras de carvão siderúrgico.

A C.R.M. pelo envio de carvão mineral para os testes.

Ao Instituto Agronômico de Campinas, na pessoa do Dr. Forster, que nos cedeu amostras de sabugo de milho.

A FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos, pelo financiamento da pesquisa através do contrato CODETEC/UNICAMP/FINEP/FNDCT/Carvão-II, código B/20/79/152/00/00.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Pesquisas pela concessão de uma bolsa de estudos.

R E S U M O

Neste trabalho discutem-se os resultados obtidos na pesquisa da combustão fluidizada de vários combustíveis.

Foram construídos e operados dois reatores de leito fluidizado, com 200 mm de diâmetro, um modelo de vidro a escala natural e um mini-leito fluidizado, sendo que este último foi utilizado no estudo da taxa de aquecimento de uma única partícula dentro de um leito pré-aquecido a cerca de 760 °C.

Desenvolveram-se testes de combustão com: carvão mineral, carvão ativado, carvão vegetal siderúrgico, cavaco de madeira, sa^ubugo de milho, serragem, casca de arroz e bagaço de cana.

Discute-se a maneira pela qual as diversas propriedades dos diferentes combustíveis influenciam a performance de um combustor de leito fluidizado.

Um dos reatores foi equipado com um sistema extrator de calor do leito como passo obrigatório na sua transformação numa mini-caldeira. Apresentam-se dados representativos de funcionamento do protótipo.

I. INTRODUÇÃO

a) Aspectos Gerais:

A tecnologia da combustão fluidizada, no sentido como hoje é aceita, teve o seu início em 1950 com o sistema "Ignifluido" desenvolvido pela "Societ  Anonyme Activit" na França. Esse sistema não utilizava extração direta de calor do leito. Processos basicamente semelhantes a esse foram usados na Rom nia, Tchecoslováquia, e na Bélgica.

Sistemas com extração direta do calor do leito foram pesquisados nos EUA (Standard Oil, Union Carbide e Combustion Engineering) e na Alemanha (Badische Anilin e Lurgi) entre 1952 e 1959.

Na década de 60 esses processos foram desenvolvidos principalmente nos EUA e Inglaterra; a partir de motivações diferentes, cujos objetivos poderiam ser atingidos através da combustão fluidizada. A necessidade de obtenção de combustíveis competitivos em qualidade e custos para o mercado doméstico, levou os ingleses   descoberta das potencialidades da combustão em leito fluidizado com vistas à geração de eletricidade (1).

Os americanos foram levados à pesquisa no desejo de conseguirem queimadores e caldeiras mais compactas, com reduzido custo de fabricação e, posteriormente, devido ao potencial da combustão fluidizada adequado ao controle da poluição atmosférica, causada

pela emissão de óxidos de enxofre e de nitrogênio.

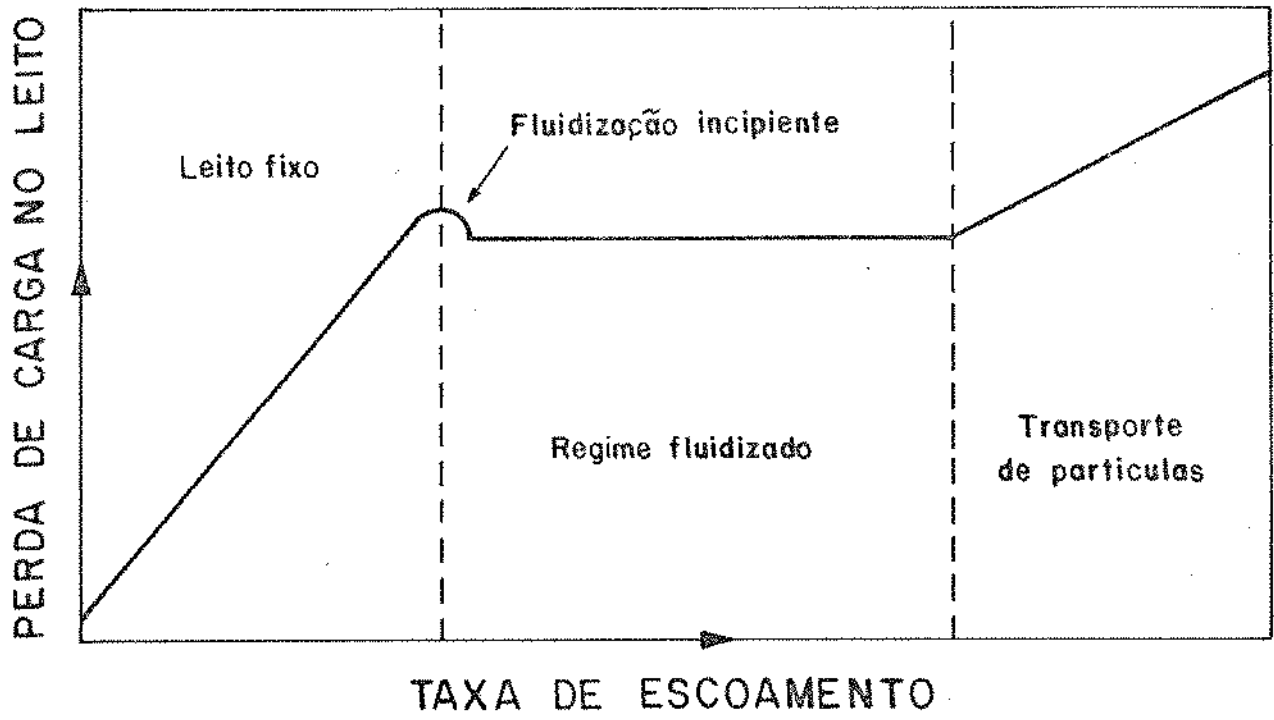
O fator de compactidade será muito favorecido pelo desenvolvimento completo de reatores pressurizados de combustão fluidizada (2), podendo atingir reduções volumétricas de até 80% em relação às caldeiras convencionais.

No Brasil, embora ainda não exista um controle rígido dos índices de poluição, a pesquisa em combustão fluidizada se tornou importante pela possibilidade de um melhor aproveitamento do nosso carvão mineral de alto teor de cinzas e de uma variada gama de outros combustíveis (3).

b) Fundamentos sobre leito fluidizado

Um leito de partículas sólidas oferece resistência ao escoamento vertical de um fluido através dele. Se a velocidade de escoamento aumenta, incrementa-se também a força de arrasto exercida sobre as partículas. Quando o fluido se escoa para cima através do leito, a força de arrasto obriga as partículas a se rearranjarem, de modo a oferecerem menor resistência ao escoamento; nesse processo o leito se expande.

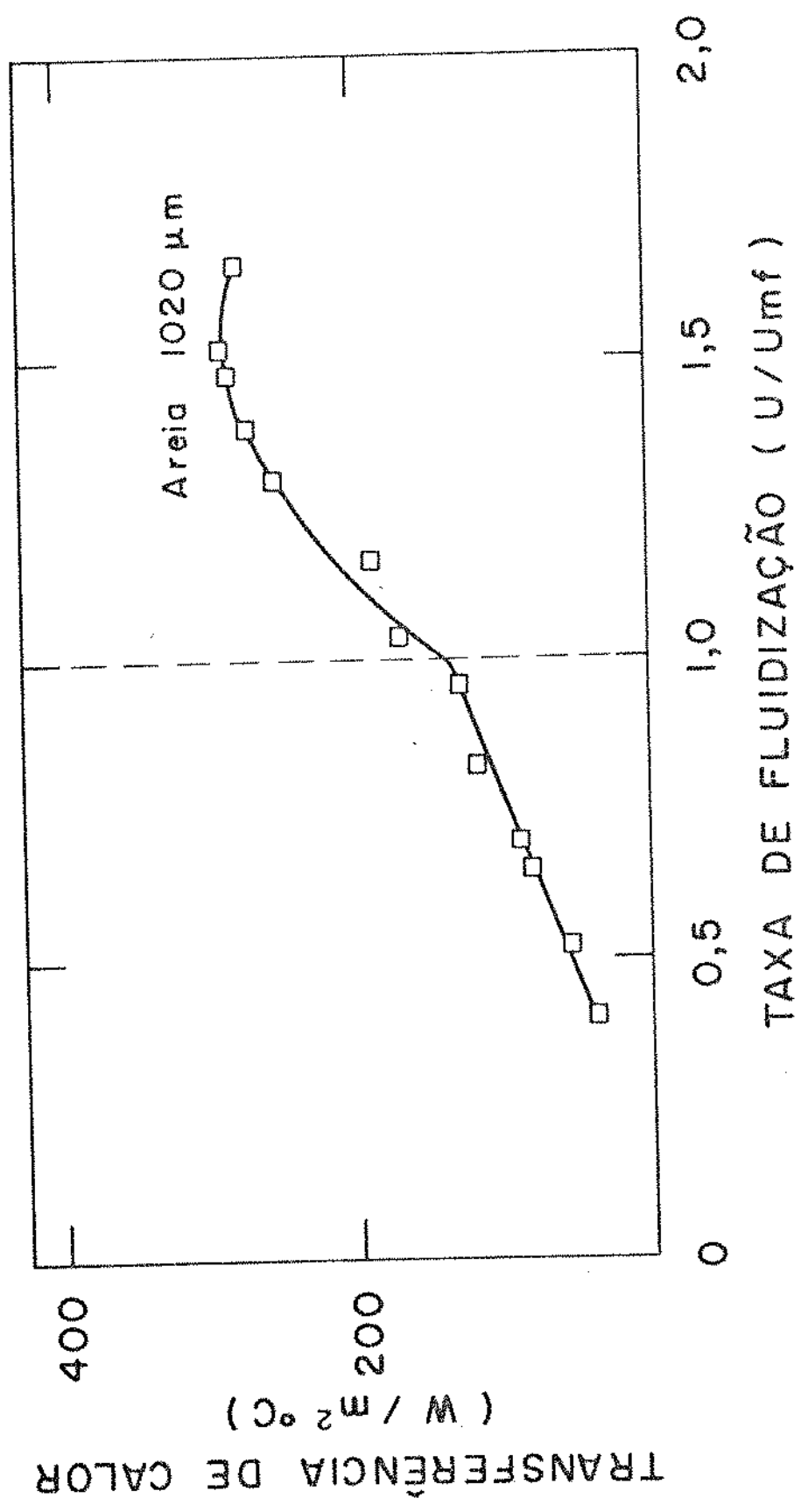
Com novos aumentos na velocidade do fluido, a expansão continua e alcança um estágio onde as forças de arrasto são suficientes para suportar o peso das partículas no leito. Neste estado chamado de fluidização incipiente (figura 1), o sistema fluido/partículas se comporta como um fluido. A velocidade do fluido nesse ponto é denominada velocidade mínima de fluidização U_{mf} .



Até o início da fluidização, o leito é expandido mais ou menos uniformemente, não importando se o fluido é um líquido ou um gás. No entanto, se o fluido é um gás, como em nosso caso, a expansão uniforme é subitamente perdida, exceto para partículas finas (1mm) e o sistema se torna instável, formando-se dentro do leito buracos contendo poucos sólidos, formados quase totalmente por gás de fluidização. Estes buracos parecem-se com bolhas e assim são chamados. As bolhas são responsáveis pela recirculação das partículas dentro do leito, que originam as excelentes propriedades de transferência de calor do sistema fluidizado.

Se a velocidade do fluido é levada além do regime de surgimento de bolhas, o leito é levado a uma situação onde as partículas são arrastadas na corrente e carregadas para fora do leito. Esse fenômeno é denominado elutriação. Partículas menores são elutriadas a velocidades menores que as necessárias para elutrir partículas maiores e a maneira como as bolhas "explodem" na superfície do leito, lançando jatos de sólidos no espaço acima do leito afeta consideravelmente a taxa de perda de partículas por elutriação.

O estado entre as condições extremas de leito fixo e a de carregamento de partículas é denominado regime fluidizado, durante o qual a perda de carga através do leito é, aproximadamente constante e suficiente para suportar o peso do leito. O efeito da fluidização sobre as taxas de transferência de calor (4) é mostrado na figura 2.



c) Teoria das duas fases

No regime fluidizado, quase a totalidade do fluxo de ar excedente ao necessário para a obtenção da fluidização inicial, atravessa o leito contido nas bolhas, provocando o surgimento de duas fases distintas:

- Uma fase de bolhas, pouco densa e de baixo conteúdo de sólidos e
- Uma fase de partículas ou fase densa, onde se concentram os sólidos que formam o leito.

A fase de partículas tem uma densidade muito próxima àquela do leito no estado inicial de fluidização, e o fluxo intersticial do gás através dos sólidos pode ser suposto igual ao da velocidade mínima de fluidização.

A ação das bolhas provocando o alto grau de mistura das partículas no leito e a grande área superficial exposta por estas são responsáveis pela rapidez com que é atingido o equilíbrio térmico entre os sólidos e o gás. Por causa de sua alta capacidade térmica em relação ao gás, as partículas no leito, sejam de combustíveis ou sólidos inertes, agem como fontes ou sorvedouros discretos de calor.

Em geral a obtenção de boas taxas de transferência de calor e uma rápida mistura dos sólidos implica em operar o reator com velocidades maiores que a velocidade mínima de fluidização. Considerando-se então que grande parte do gás está passando contido

nas bolhas, torna-se importante conhecer quão efetivo é o contato entre este gás e os sólidos que constituem o leito. Estudos experimentais (5) mostraram que o padrão de fluxo do gás associado a uma bolha, depende fortemente da razão α , entre a velocidade da bolha e a U_{mf} . Em um leito com partículas inertes grandes ($\geq 1\text{mm}$), essa razão é menor que 1; enquanto para leitos formados por partículas pequenas ($< 0,1\text{mm}$) a razão será maior que 1.

Quando α é menor que 1, ocorre um fluxo de gases da fase densa através da bolha, entrando pela sua base e saindo do topo. Assim, o gás contido nas bolhas está continuamente mudando. Para α maior que 1, forma-se uma região de recirculação de gás nas fronteiras da bolha com a fase densa. O gás na bolha recircula continuamente em seu interior e tem pequena penetração na fase densa, a extensão dessa penetração diminui com o aumento de α .

d) Transferência de calor em leito fluidizado.

A transferência de calor em leito fluidizado (6) ocorre simultaneamente por condução, convecção e radiação:

1- Condução: o mecanismo de transferência de calor por condução é tal que o calor é transferido para ou de uma superfície, pelo contato de partículas durante um curto intervalo de tempo, no qual a partícula fornece ou absorve calor e, a seguir, retor

na ao corpo do leito. Devido a esse processo o coeficiente de transferência de calor é afetado pelo tamanho das partículas que formam o leito.

2- Convecção: o processo de transferência convectiva de calor é efetivamente condução molécula a molécula através de uma fina camada entre as partículas quentes e a superfície de troca de calor. Por isso o coeficiente de troca de calor é uma função da espessura da camada e da condutividade média do gás. Como consequência, esse coeficiente aumenta com:

- Partículas menores devido a uma camada mais fina de gás em torno da partícula e
- Temperaturas maiores no leito, devido ao aumento da condutividade térmica do gás.

Se o leito está em regime turbulento, com bolhas, a velocidade de fluidização só tem influência no processo de transferência de calor pelo fato de determinar o tamanho dos sólidos que formam o leito.

3- Radiação: a importância da transferência de calor por radiação aumenta rapidamente com a temperatura de operação do leito, podendo ser responsável por 20% a 50% do total de calor transferido. A radiação considerada é a oriunda das partículas vizinhas às superfícies de troca de calor, e a temperatura média destas pode ser considerada abaixo da temperatura do leito.

e) Modelos de combustão

No regime fluidizado, a ocorrência de bolhas provoca o surgimento de duas fases distintas dentro do leito, uma fase de bolhas e uma fase densa ou de partículas, sendo que a massa de combustível se concentra em geral na fase densa.

O processo de combustão fluidizada de carvão (0 - 10mm), já tem sido bem pesquisado e alguns modelos têm sido propostos para explicar o seu mecanismo:

1- Avedesian e Davidson (9):

O mecanismo proposto por estes autores, para a queima do carbono fixo do carvão, supõe que, a temperaturas de operação do reator, 900 C, todas as reações químicas são muito rápidas e, conseqüentemente, a taxa de queima do combustível será controlada pela difusão do oxigênio até a superfície das partículas.

É suposto existirem dois valores de concentrações distintos de oxigênio no leito: C_b na fase de bolhas e C_p na fase densa, sendo, em geral, C_p menor que C_b . O processo de difusão ocorre então em duas etapas:

- Transferência de O_2 , contido nas bolhas para a fase densa e
- Transferência de O_2 , na fase densa até a superfície das partículas.

2- J.M.Beēr (10):

Este modelo considera a existência de voláteis queimando dentro do leito, e que a combustão de partículas ocorre através de dois fluxos oxidantes de oxigênio,

- fluxo de O_2 até a superfície externa da partícula,
- fluxo de O_2 para a superfície interna através dos poros existentes. O alcance do fluxo oxidante para a reação de combustão interna à partícula é, portanto, uma função da porosidade do combustível.

A queima da matéria volátil do combustível irá ocorrer de dois modos:

- Em uma chama de difusão em torno das partículas,
- Em uma chama pré-misturada através do volume do leito.

3- Chakraborty e Howard (11):

Esses autores mostraram a existência de outros fatores importantes no controle da taxa de combustão, tais como efeitos cinéticos e de transferência de O_2 por convecção forçada. Seus experimentos foram realizados visando o estudo da combustão do carbono fixo do carvão.

f) Vantagens e limitações da combustão fluidizada.

A fluidização tem sido utilizada para operações que envolvam o contato sólido fluido, sempre que sejam necessárias altas taxas de transferência de calor e de massa.

As vantagens dessa técnica podem ser listadas como:

1- Oferecer uma superfície de contato entre sólido e fluido, extremamente grande (1 m^3 de partículas de $0,1 \text{ mm}$ tem área superficial maior de 30.000 m^2). Esta área superficial muito grande permite a obtenção de excelentes taxas de transferência de calor e de massa entre sólido e fluido, permitindo a construção de câmaras de combustão mais compactas.

2- Redução do gradiente de temperatura através do volume do leito, como consequência do alto grau de mistura dos sólidos no sistema, propiciando uma condutividade interna, do leito, muito alta.

3- Altas taxas de transferência de calor entre as partículas sólidas no leito e uma superfície imersa.

4- Temperaturas de operação mais baixas, minorando os problemas de materiais em um queimador de leito fluidizado. Além disso, baixas temperaturas inibem a formação de óxidos de nitrogênio.

5- Alta tolerância de inertes no leito, durante a combustão, propiciando o seu uso na queima de combustíveis de alto teor de cinzas.

6- Possibilidade de se promover a queima de diferentes combustíveis, sem mudanças significativas no corpo do reator, decorrente da baixa concentração de combustível no leito e também do fato que, desde que todo combustível seja completamente queimado dentro do leito, a geração de calor é proporcional ao ar consumido.

7- Fácil controle da poluição causada por óxidos de enxofre decorrentes da queima de carvão mineral, pela adição de calcário ou dolomito ao leito.

8- Alta eficiência de queima com combustíveis de baixo poder calorífico.

Entre as limitações e desvantagens do processo de fluidização, estão:

1- O processo necessita de bombeamento de ar com alta pressão de cabeça (cerca de $0,1 \text{ Kg/cm}^2$)

2- Funcionamento dentro de faixas restritas de fluidização (ou velocidades de escoamento); se a vazão de ar é baixa, não há fluidização, e se é demasiada, provoca a perda excessiva de material por elutriação. Com relação às perdas por elutriação já foi desenvolvida uma técnica, onde essa desvantagem se transforma na qualidade e característica principal do processo (7).

3- Alguns combustíveis apresentam dificuldades de serem fluidizados por apresentarem características de aglomeração a altas temperaturas.

II. DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Para a realização dos experimentos foram construídos dois reatores de combustão fluidizada com tamanho de bancada, sendo um deles equipado com resfriamento a água através de espiras de tubos de aço, formando uma parede de água. Para ajudar na interpretação dos resultados, construíram-se também um modelo de vidro com as mesmas dimensões dos reatores e um mini-leito fluidizado.

a). Cálculo do reator:

No projeto de um combustor de leito fluidizado devem ser considerados parâmetros tais como: quantidade de calor necessária, tipo de combustível, ar necessário, altura do leito, velocidade de fluidização, perda de carga na placa distribuidora, perda de carga através do leito (cerca de 1 mm de H_2O , por mm de profundidade do leito) e a relação entre a altura do leito e o diâmetro interno do queimador.

Entre os parâmetros citados, o último merece um pouco de explicação por não ser tão comum. O aumento da razão entre a altura do leito e o seu diâmetro, favorece o surgimento do "slugging" que se caracteriza pelo crescimento do volume das bolhas no leito, por coalescência, chegando a ocupar toda a secção transversal do reator. Nessas condições o material do leito é impulsio-

nado pelo gás, como um pistão, até que ocorra uma instabilidade e provoque o desmoronamento dos sólidos de volta ao leito. A ocorrência do "slugging" prejudica a fluidização.

Os fatores preponderantes considerados na construção e projeto dos reatores, usados neste trabalho, foram:

- 1- A capacidade máxima de nosso compressor ($68 \text{ m}^3/\text{h}$).
- 2- Velocidade de fluidização.
- 3- Perda de carga na placa distribuidora
- 4- Perda de carga através do leito.

O diâmetro do reator foi limitado pela capacidade máxima do compressor e a velocidade desejada de fluidização. Escolheu-se o valor de 2 m/s , a 850 C , para a velocidade máxima de fluidização, tendo-se em vista problemas com a elutriação de finos, a velocidades maiores. Com esses dois dados, determinou-se a área transversal do leito e, portanto, o diâmetro do reator, segundo o seguinte cálculo:

$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A$, onde:

$\dot{m}$ = vazão de ar do compressor, $68 \text{ m}^3/\text{h} = 0,022 \text{ kg/s}$

ρ = densidade do ar a $850 \text{ C} = 0,3139 \text{ kg/m}^3$

v = velocidade do ar, 2 m/s

A = área da secção transversal do leito

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = 0,035 \text{ m}^2$$

$$d = 0,21 \text{ m}$$

Portanto, o diâmetro escolhido para o reator foi da ordem de 20 cm. A melhor solução para a sua construção foi a utilização de um tubo padrão de 10", posteriormente revestido internamente na região do leito, com uma camada de cimento refratário, que tinha dupla função: proteger a parede do queimador contra a ação do leito quente e ajustar o diâmetro interno ao valor desejado.

b). Projeto da placa distribuidora

Em um reator de combustão fluidizada, o custo do bombeamento de ar de fluidização é um item importante no custo total do processo e torna-se importante por isso, que a perda de carga através do distribuidor seja a menor possível. Por outro lado, é essencial que haja uma distribuição uniforme de ar dentro do leito, e, se a perda de carga for insuficiente, poderá favorecer a formação de canais ou trajetórias de baixa resistência ao escoamento, por onde fluirá todo o ar acarretando a perda de fluidização no resto do leito. Também deve ser considerado que aumentos exagerados na perda de carga, não levam necessariamente a uma uniformização da fluidização através de todo o leito, podendo também acarretar o surgimento de regiões mais quentes na base do reator.

Os dados de Hiby (4) indicam que a perda de carga na placa distribuidora pode ser expressa como uma fração da perda de car-

ga através do leito:

$$\frac{\Delta P_D}{\Delta P} = 0,15 \quad \text{para } U/U_{mf} = 1 - 2$$

$$\frac{\Delta P_D}{\Delta P} = 0,015 \quad \text{para } U/U_{mf} \gg 1$$

onde: ΔP_D = perda de carga na placa distribuidora

ΔP = perda de carga através do leito

U = velocidade de fluidização

U_{mf} = velocidade mínima de fluidização

As funções que uma placa distribuidora deve satisfazer para um bom desempenho são:

- 1- Introduzir o ar de fluidização ao leito
- 2- Prevenir o refluxo de material do leito, quando em operação ou mesmo quando não há fluidização.
- 3- Promover uma fluidização uniforme e estável através de todo o leito.

A placa distribuidora do reator foi construída com furos da ordem de 1 mm, para satisfazer as duas primeiras condições. Para a promoção da fluidização estável e uniforme foi calculada a perda de carga através de um orifício e então estimou-se o nũ-

mero de orifícios necessários para a perda de carga desejada. Posteriormente, a placa assim projetada foi testada e como a perda de carga se apresentasse um pouco superior ao esperado, foi feita a correção, aumentando-se o número de furos.

c). Projeto da geometria do leito

A altura do leito foi escolhida, tendo-se em vista:

1- A necessidade de variar a altura do leito como um dos parâmetros importantes no estudo da eficiência e controlabilidade da combustão, e sua influência na queima de voláteis dos combustíveis dentro do leito.

2- Evitar a ocorrência do "Slugging"

3- A altura do reator, cerca de 2 m, que foi limitada pelo espaço disponível para a instalação e pela opção de se fazer a alimentação ao topo do leito, onde mesmo o alimentador de rosca era operado manualmente.

4- Finalmente a necessidade de se ter um espaço livre acima do leito, suficiente para que as partículas ejetadas do leito, pela fluidização mais vigorosa com a presença de bolhas, possam retornar ao leito sem sofrer elutriação.

Com base nessas premissas, decidiu-se limitar o intervalo de variação da altura do leito entre 0 e 50 cm, equivalente a uma perda de carga máxima, através do leito, de 50 cm de H_2O .

III. DESCRIÇÃO DOS REATORES E DEMAIS MONTAGENS EXPERIMENTAIS.

a). Reator sem resfriamento, instrumentação e sistemas de alimentação:

O reator foi construído com um tubo padrão de aço de 10", figura 3, tendo uma altura total de 2 m. Para facilitar as operações de manutenção e montagens, o corpo do reator foi dividido em três partes:

1- Base - que fixa o reator ao solo e também lhe serve de suporte para o corpo. É pela base que se dá a admissão do ar para a combustão e fluidização.

2- Queimador propriamente dito - tem 1 m de altura e sua metade inferior, que contém o leito de combustão, é revestida de cimento refratário para a proteção das paredes do queimador. O revestimento refratário não tem características de isolamento térmica e serve também para reduzir o diâmetro interno do queimador até o valor de 20 cm. A metade superior do queimador, não sendo revestida com a camada refratária, tem um diâmetro interno de 25 cm, permitindo, devido ao aumento na área da secção transversal, uma diminuição na velocidade do gás de saída, minimizando a elutriação de partículas.

3- Parte superior - sua função é aumentar o espaço livre acima do leito de combustão, visando diminuir a taxa de elutriação de sólidos e também permitir que, na presença de oxigênio

disponível, seja completada a queima de voláteis e partículas de combustível que escapam a combustão no leito.

Ainda na parte superior estão: a saída dos gases de combustão através de uma conexão para um ciclone coletor de sólidos (C), uma abertura do topo por onde se pode fazer a adição manual de combustível ou areia do leito. Posteriormente foi instalada nessa parte um alimentador com rosca de 50 mm de diâmetro.

A admissão e distribuição de ar ao leito foram feitas inicialmente através de uma placa plana perfurada de aço inox, com 1,5 mm de espessura e com orifícios menores de 1 mm. Durante os testes essa placa sofreu deformações significativas, devido à ação da temperatura e sua pouca espessura. Consequentemente, ela foi trocada por outra placa, também de aço inox, mas com 5 mm de espessura, com a qual eliminamos o problema de deformações. Foram mantidos, nessa segunda placa, o número e o diâmetro dos furos, bem como o diâmetro da própria placa.

A fixação da placa distribuidora é feita entre a base e o queimador por uma flange. Embora o suprimento de ar durante os testes, tenha sido feito por um compressor de pistões, o ideal seria o uso de um ventilador centrífugo que além de permitir um bom controle da vazão, necessita de menos potência para o seu funcionamento. O fluxo de ar é medido com o uso de uma placa de orifício calibrada (F) acoplada a um manômetro de mercúrio.

O ar fornecido pelo compressor pode ser aquecido, eletricamente, (B) até 250C.

Foi soldada no corpo do reator uma série de tubos de 1" de diâmetro que são usados para medidas de pressão e temperatura, alimentação de combustível ou para retirada de material que trans_uborde do leito. Desde que todas as conexões são iguais, esses tubos podem ser usados indistintamente para qualquer das funções citadas acima.

A alimentação de combustível pode ser realizada pneumaticamente dentro do leito e também por gravidade sobre a superfície do mesmo, usando-se, ou o alimentador de rosca ou manualmente, através da abertura no topo do reator para partículas que sejam grandes ou difíceis de serem alimentadas por rosca.

A taxa de alimentação de combustível, da quantidade alimentada, ou da adição de areia ao queimador, é medida pelo registro na folha de teste. Para alimentação manual foi utilizado sempre um bequer de volume constante e conteúdo de massa conhecido, que servia de medida para a alimentação e anotava-se o número de alimentações feitas a cada 5 minutos.

Para a alimentação pneumática, ou mais frequentemente por rosca, a taxa de alimentação foi medida pesando-se, em baldes plásticos, a quantidade de combustível a ser utilizada durante o teste. Ao final do teste era feita nova pesagem, considerando-se o combustível não utilizado (o que estava ainda nos baldes e o que ainda restasse dentro do depósito do alimentador). A diferença entre os resultados das pesagens e o tempo de alimentação, durante o teste nos dava a taxa média de alimentação.

As medidas de temperatura foram realizadas, inicialmente, por termopares de fios, cuja junção foi feita pela fusão dos termoelementos. Os termopares assim preparados eram colocados no corpo do reator através dos tubos de 1", já citados, dentro de capas protetoras de tubos de aço de 1/4". Os tubos protetores avançavam até o centro do reator e eram mantidos fixos nessa posição. Nas operações de limpeza, os fios, por serem livres, eram

frequentemente torcidos, provocando quebras nas junções dos termoelementos e o fato de suas proteções serem fixas provocou o rápido desgaste dos dois medidores que ficavam próximos do leito fixo nos momentos de ignição, chegando, por vezes, a serem fundidos.

Diante desses inconvenientes, os termoelementos foram trocados por termopares Pyrotenax de 2mm de espessura e 30 cm de comprimento. Esses medidores foram acoplados ao reator, de maneira a possibilitar a sua rápida retirada e colocação em situações de perda de fluidização ou durante a ignição.

Os termopares são ligados a um registrador de seis pontos. Além desse registrador, pudemos contar, durante os últimos testes, com um registrador contínuo para a temperatura do leito. O termopar desse registrador foi colocado a 7 cm acima do distribuidor e sua leitura contínua serviu para o controle da taxa de alimentação do combustível.

As medidas de pressão foram transmitidas por tubos plásticos até um conjunto de manômetros de água, ligados a um reservatório comum. A vantagem desse tipo de manômetro é fornecer-nos a leitura direta, sem os erros devidos às oscilações, comuns nos manômetros em "U".

Em geral, as amostras de gás de saída do reator foram recolhidas depois que os sólidos carregados na corrente de gás foram

extraídos com a passagens dos gases pelo ciclone. Mesmo assim, antes de ser analisada, a amostra gasosa passava por um filtro de lã de vidro que retinha partículas muito finas não separadas pelo ciclone. A presença dessas partículas, embora em pequena quantidade, indica a necessidade de um segundo ciclone em série com o primeiro.

As medidas de dióxido de carbono, oxigênio e de monóxido de carbono foram feitas, usando-se um aparelho de Orsat, embora tenham sido feitas, também, análises com um cromatógrafo. As medidas realizadas com o cromatógrafo exigiam que as amostras fossem recolhidas em ampolas de vidro para análise posterior, não servindo, portanto, para controle da combustão no leito. No processo de coleta de amostras foi usado, além do filtro retentor de sólidos, uma ampola de pentóxido de ferro para absorção de água contida no gás.

As medidas com o cromatógrafo visavam à determinação de óxidos de enxofre e de nitrogênio durante os testes com carvão mineral.

O fato de trabalharmos com um compressor de pistões, para 6,3 atm de pressão, impôs, como medida de segurança, a colocação de discos de amianto de 1/4" de espessura, na linha de ar e no tempo de reator. Essa providência visou evitar possíveis sobrecargas de pressão no manômetro de mercúrio, na placa distribuidora e no tubo simulador de vidro.

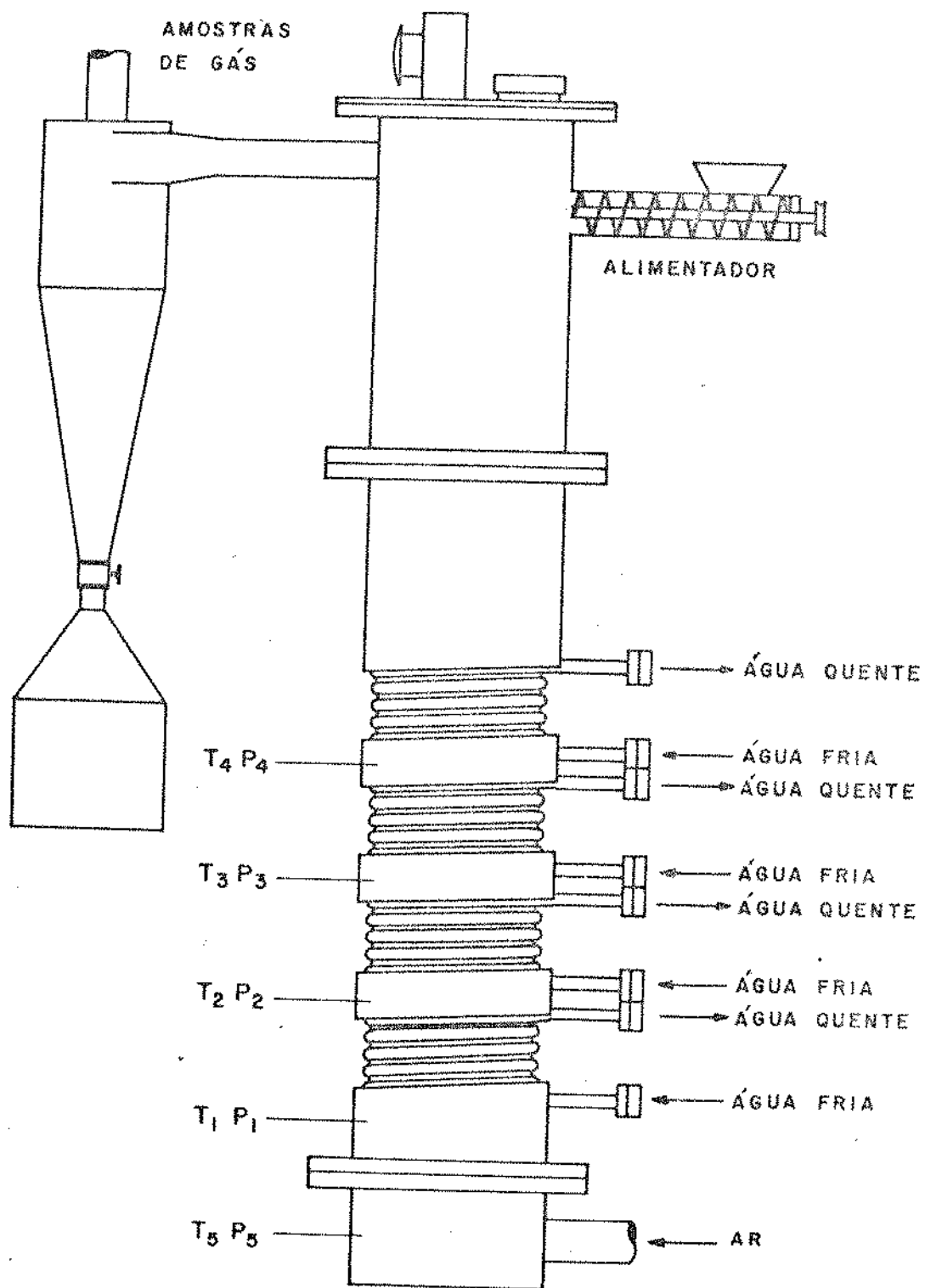
b) Reator com resfriamento a água.

Este aparelho, mostrado esquematicamente na figura 4, difere do anterior unicamente pela secção do queimador que foi construída com espiras de tubo de aço de 1/2" de diâmetro interno, soldadas à parede do queimador, formando uma parede de água, que foi usada para estudos da extração de calor do leite. As medidas de fluxo de água foram feitas primeiramente através do registro do tempo necessário para encher um volume conhecido, procedimento usado para todas as espiras do sistema de extração de calor. Posteriormente foi construído um conjunto de 4 manômetros de mercúrio para a medida da vazão.

As medidas da temperatura de entrada e saída da água foram feitas com termômetros de mercúrio e também com termopares ligados a um multímetro digital.

Internamente, entre as espiras, foi também usado cimento refratário para proteger as paredes do queimador. O objetivo desse reator com resfriamento a água foi a obtenção de dados para o projeto e dimensionamento de um protótipo de caldeira de leite fluidizado.

DISCO DE SEGURANÇA



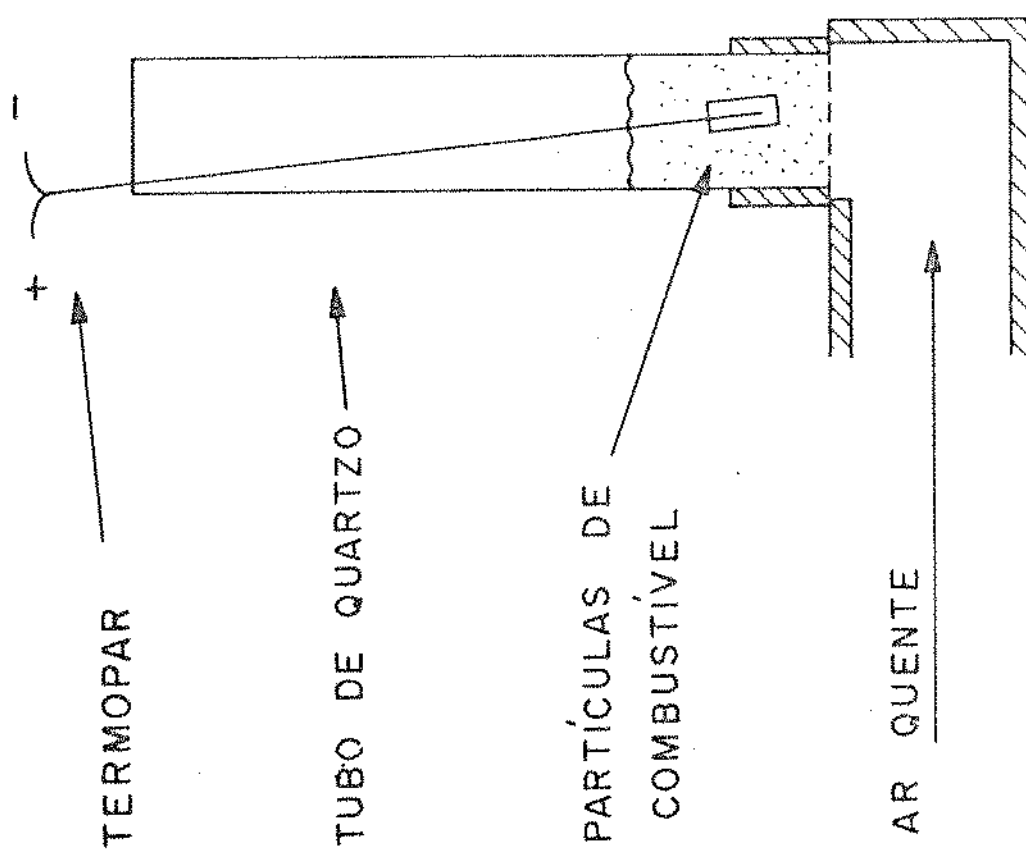
c) Modelo de vidro

O modelo de vidro foi construído com um tubo de vidro de 25 cm de diâmetro e 1,60 m de altura, montado sobre uma placa distribuidora de 1,5 mm de espessura e com o mesmo padrão de furos que aquelas dos reatores de combustão. Este modelo é usado para:

- observar a formação e o padrão de bolhas durante a fluidização.
- estudar a frio as condições de mistura dos combustíveis dentro do leito de combustão.
- testar as placas distribuidoras, quanto à distribuição de ar e a estabilidade de fluidização.

d) Mini-leito de combustão fluidizada.

O mini-leito, figura 5, constitui-se de um tubo de quartzo com 65 mm de diâmetro interno e 400 mm de altura. Está preso a uma placa distribuidora, através e internamente, de um tubo de ferro de 3" e está fixado ao tubo com cimento refratário. O mini-leito é fluidizado por ar aquecido por um queimador de G.L.P. que pode elevar a temperatura do gás de fluidização até cerca de 500 C. O tubo de ferro contém duas aberturas laterais pelas quais é feita a observação visual do processo de combustão e fluidização do mini-leito.



e) Caracterização dos combustíveis

A caracterização dos combustíveis foi realizada com o uso de:

1- Uma estufa de ar quente dotada de um fluxo de nitrogênio seco por uma solução de ácido sulfúrico concentrado para determinação de umidade dos combustíveis queimados nos reatores.

2- Uma mufla com temperaturas de 0 - 1200 C, para determinação do conteúdo de voláteis e de cinzas.

3- Uma bomba calorimétrica e termômetros Beckmann de mercúrio de 15 - 25 C, 20 - 30 C, 25 - 35 C, com graduações de 0,01 C.

As determinações de umidade, voláteis e de cinzas dos carvões vegetal ativado, mineral e resíduos de carvão siderúrgico, foram feitas segundo as normas ASTM para carvões e coque.

As determinações de umidade, voláteis e de cinzas para sabugos de milho, serragem, cascas de arroz, bagaço de cana e cavacos de madeira foram realizadas segundo as normas ASTM para madeira.

As determinações de poder calorífico dos diferentes combustíveis foram realizadas baseadas nas normas ABNT-MB 51 R e normas ASTM para determinação de poder calorífico de combustíveis sólidos.

IV. METODOLOGIA DE TESTES

O primeiro objetivo foi conseguir que o funcionamento do leito fluidizado (ignição e operação), se tornasse uma rotina para se poder julgar os testes a partir de condições semelhantes. Na e tapa seguinte estabeleceram-se as condições "ótimas" de operação do reator para cada tipo de combustível através do contrôle de diversos parâmetros típicos da combustão fluidizada como: tamanho de partículas, tipo de combustível, altura do leito, velocidade de fluidização, temperatura de operação, concentração de combustível no leito, etc...

Os diferentes testes realizados são descritos a seguir:

a) Variação da concentração de carvão no leito:

Esses testes constituíram a nossa primeira tentativa de se estudar a otimização da combustão com o leito fluidizado e foram realizados sempre com o reator sem resfriamento adicional por água. O procedimento para esses experimentos foi: promovia-se a ignição de um leito fixo de carvão ativado; após o que aumentava-se a vazão de ar, promovendo-se a fluidização do leito de combustível. A seguir adicionávamos todo o combustível a ser queimado no teste em duas vezes dentro de um curto intervalo de tempo. Observado o fato de que não foi prejudicada a fluidização com a súbi ta adição de combustível, fechava-se a tampa do reator e iniciavam-se as medidas das concentrações de CO_2 , O_2 e CO no gás de

saída com um aparelho de Orsat.

Para preservarmos constante o volume do leito era adicionada areia, à medida que se processava a queima de carvão, com a finalidade de se repor o volume da substância queimada, melhorar as condições de fluidização, impedir um aumento exagerado da temperatura do leito e variar a concentração de combustível no leito.

A adição de areia ao leito durante os testes foi dosada de tal maneira que o final da queima do combustível coincidissem com o fim da alimentação de areia.

O valor da concentração de carbono no leito foi calculado para cada teste a partir das medidas de vazão de ar através do leito da concentração de CO_2 , O_2 e CO no gás de saída, da quantidade de combustível alimentada (incluindo-se o carvão utilizado na ignição), da quantidade de combustível elutriado e recolhido pelo ciclone e também do conhecimento do quanto de combustível não queimado permaneceu no leito.

Os parâmetros considerados na realização e análise desses experimentos foram:

- Altura ou volume do leito: foram mantidos essencialmente constantes durante cada teste embora sofressem variações intencionais durante a série de experimentos.

- Temperatura do leito: seu valor foi limitado sempre pela quantidade de oxigênio disponível no ar de fluidização e também pela adição de areia usada para manter o volume do leito.

- Tamanho de partícula: o seu valor foi usado sempre dentro de um intervalo estreito de valores tais como 2 - 4 mm ou de 6 - 10 mm, etc... O tamanho de grão do combustível sofreu de teste para teste uma variação intencional, no entanto durante o transcorrer de cada teste havia também uma variação devido a queima superficial da partícula e ao atrito com o material do leito.

- Concentração de combustível no leito: sua variação não sofreu controle voluntário durante os testes. Seus valores foram estudados em função do tamanho de partículas e do nível de CO no gás de saída visando a otimização da combustão.

- Velocidade de fluidização: embora o seu valor permanecesse constante durante cada teste, em testes diferentes sofreu variação orientada com vistas a determinação de sua influência sobre a taxa de combustão, temperatura do leito, elutriação e condições de fluidização.

Resumindo esses foram testes que apresentavam uma concentração inicial de carvão de 100% e 0% de areia e uma concentração final de cerca de 100% de areia e quase nenhum combustível no leito .

O combustível utilizado em todos os experimentos foi carvão vegetal ativado, não por ser altamente reativo e portanto de fácil queima, mas primeiramente por não apresentar propriedades aglomerativas ou de expansão e também por ser facilmente encontrado em tamanhos selecionados de grãos, possibilitando a realização de experimentos com variação bem determinada do tamanho de

partículas. Além dessas razões, também contribuiu para a sua escolha o fato de apresentar sempre condições uniformes de umidade e de poder calorífico.

b) Testes de operação contínua para diferentes combustíveis

Aqui repetiu-se o procedimento para a ignição que foi sempre o mesmo em todos os experimentos. Uma vez obtida a ignição, o leito era formado até a altura desejada, pela adição alternada de combustível e areia. A areia utilizada foi sempre areia de construção, menor de 0,833 mm (-20 Tyler mesh). O combustível usado para a ignição foi novamente carvão vegetal ativado fino (2 - 4 mm) e para o processo de formação do leito, utilizou-se de carvão vegetal ativado de 6 - 10 mm de resíduos de carvão vegetal siderúrgico (2 - 50 mm).

Com o leito já formado, com altura e volume desejados, iniciavam-se as medidas de gás para CO_2 , O_2 e CO com o Orsat, as quais eram então feitas a cada 6 ou 7 minutos durante todo o transcorrer do teste. O objetivo de se fazer as medidas de concentrações de gás antes do início da queima do combustível testado foi determinar as condições iniciais do leito.

Somente então com o leito já formado e com a temperatura desejada (cerca de 800°C) é que mudávamos a alimentação para o combustível a ser testado. Foram testados cavacos de madeira, bagaço de cana, sabugos de milho, resíduos de carvão siderúrgico em diferentes tamanhos, cascas de arroz, serragem de madeira e carvão mineral.

Na grande maioria dos testes a alimentação foi feita por gravidade e dependendo do tipo de combustível usamos ou o alimentador de rosca ou alimentação manual ao topo do reator. A alimentação pneumática foi testada menor número de vezes para cascas de arroz e serragem de madeira, sendo também possível para finos de carvão mineral ou vegetal.

Os testes de operação contínua foram realizados com os dois reatores: com e sem resfriamento adicional por água. Durante os experimentos o controle foi feito através:

- do registro de temperatura no leito e em outros pontos do reator
- da análise do gás de saída
- da vazão de ar
- do controle da taxa de alimentação
- do evitamento da emissão de fumaça (voláteis não queimados)

Para a queima com o reator provido com o sistema de resfriamento por água, havia a necessidade do controle de mais de duas variáveis:

- vazão de água
- temperatura de entrada e saída de água

c) Testes com variação do volume do leito

A variação do volume do leito foi feita com adições consecutivas de 1 litro de material inerte (areia) ao leito. A unidade

volumétrica usada foi um becker de 1000 ml. O volume mínimo de material inerte no leito (baseado em medida compacta de volume) foi 1 litro de areia e o volume máximo foi 6 litros. A adoção de uma medida compacta para o volume do leito foi escolhida porque, devido as instabilidades na superfície do leito provocadas pelas explosões das bolhas, torna-se um pouco difícil a medida correta do seu volume.

Esse tipo de teste foi realizado para cavacos de madeira, sabugos de milho e resíduos de carvão vegetal siderúrgico. Para cada altura do leito foram feitas medidas de temperatura, análise de gás e da velocidade de fluidização. Além disso foi feita a observação visual para controle da emissão de chamas e fumaça no espaço livre acima do leito e da qualidade de fluidização para combustíveis de grãos grandes em condições de leito raso.

Os objetivos desses testes foram: verificação da controlabilidade da combustão em leito raso para os diversos combustíveis, verificar o efeito da altura do leito na combustão de voláteis e também o efeito da velocidade de fluidização (ou excesso de ar) na emissão de fumaça.

d) Testes de simulação a frio:

Foram realizados com o modelo de vidro. Consistiram basicamente na fluidização a frio de um leito de areia e combustível em concentrações semelhantes às usadas em testes de combustão. Como para uma mesma vazão, a velocidade de fluidização a quente

é maior que a velocidade a frio, foi necessário operar o compressor a pressões maiores por curtos intervalos de tempo a fim de simular as condições de fluidização a quente.

Após fluidizar a mistura areia e combustível por tempo suficiente o leito foi concentrado pela interrupção brusca do fluxo de ar. Este processo, além de provocar a compactação do leito, também preservou as posições relativas ocupadas pelas partículas de combustível no instante da interrupção do fluxo de ar. O padrão de mistura de combustível e inertes no leito foi verificado visualmente e pela divisão do leito em secções transversais. Estas secções foram cuidadosamente retiradas com uma pequena pá sendo em seguida submetidas a separação por peneiras. As quantidades de combustível e areia existentes em cada secção foram pesadas determinando-se assim a distribuição de combustível nas diversas camadas do leito.

Estes testes foram realizados para todos os combustíveis queimados com a finalidade de se determinar o padrão e a eficiência da mistura inertes-combustível no leito de combustão. No entanto para bagaço de cana, serragem e casca de arroz as etapas de peneiração e pesagem não foram realizadas devido às dificuldades de separação desses combustíveis do material do leito.

e) Testes da taxa de aquecimento de partículas

Os testes para determinação da taxa de aquecimento das partículas em um leito fluidizado foram realizados com o uso do

mini-leito. Este era formado da mesma areia usada nos reatores maiores e era prē-aquecido pelo ar de fluidização até 500°C e depois sua temperatura era elevada até o valor desejado pela queima de granulos de carvão vegetal no próprio leito.

As partículas de combustível testadas eram perfuradas por uma broca até seus centros e depois recebiam um fino termopar que foi mantido preso na perfuração. Assim preparadas as partículas foram colocadas suspensas dentro do mini-leito e a variação da temperatura no seu centro foi registrada em graficador ligado ao termopar dentro da partícula.

Foi feita também a observação visual da devolatização da partícula e a medida do tempo gasto para a sua ignição. Essa observação pode ser feita através do tubo de quartzo.

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante todo o período de pesquisas foram realizados cerca de 60 testes, através dos quais foi estudada a performance dos reatores de combustão fluidizada na queima dos diversos combustíveis testados.

Usando-se o reator com extração de calor do leito estudou-se a queima dos resíduos vegetais para a obtenção de dados com vistas ao projeto de uma caldeira de leito fluidizado em uma escala maior que a dos nossos atuais queimadores.

A caracterização dos combustíveis através da análise imediata, determinação do poder calorífico e tamanho de partículas estão condensadas na tabela I.

Analisando os resultados dessa tabela, vê-se que a densidade (bulk density) dos combustíveis vegetais é menor que a dos carvões vegetais, aliado ao fato de que os carvões apresentam poderes caloríficos maiores que os correspondentes aos dos resíduos agrícolas e da madeira. Vemos, portanto, que, para uma mesma taxa de geração de calor, será necessário movimentar um volume consideravelmente maior desses combustíveis em relação ao volume necessário de carvão vegetal.

Embora a densidade do carvão mineral se apresente maior que a dos carvões vegetais, seu poder calorífico é grandemente afetado pelo alto teor de cinzas apresentado. Uma análise semelhante à da realizada entre carvões e resíduos vegetais nos mostra que,

	densidade (kg/m ³)	umidade (%)	cinzas (%)	voláteis (%)	P.C. (Kcal/Kg) (base seca)	tamanho de partícula
Carvão vegetal ativado	498	2	1,2	1	8300	0,2 - 1,0 cm
Resíduos car- vão						
Siderúrgico	420	7	2	16-30	7500-8000	0,5 - 5,0
Carvão mineral	1092	6	30-50	8-19	4940-3528	0,2 - 1,5
Cavaco madeira	311	30-45	0,3	85-88	4300	2,5
Sabugo de milho	190 (*)	12	1,0	86	4840	2 - 13
Serragem	160 (*)	25	0,3	80	4500	-
Casca de arroz	151 (*)	12	11	74	4802	-
Bagaço de cana	80 (*)	40	3	82	4500	-

Tabela I - Caracterização dos combustíveis.

(*) Esses valores irão variar com o grau de compactação do combustível.

para uma mesma taxa de geração de energia, será necessário movimentar massas maiores de carvão mineral, em relação à massa requerida de carvão vegetal.

Os resultados desses estudos comparativos estão expressos na tabela II.

Tabela II

Combustível	Kg/Mcal	m ³ /Mcal (x10 ⁻³)	Quantidade de combustível para mesma energia (base: carvão ativado)	
			Massa	Volume
Carvão vegetal ativado	0,12	0,24	1	1
Resíduo carvão siderúrgico	0,13	0,32 a 0,30	1,11 a 1,04	1,33 a 1,25
Carvão mineral	0,28 a 0,20	0,26 a 0,019	2,35 a 1,68	0,79 a 1,08
Cavaco de madeira	0,23	0,75	1,93	3,13
Sabugo de milho	0,21	1,1	1,71	4,58(*)
Serragem	0,22	1,4	1,84	5,8 (*)
Casca de arroz	0,21	1,4	1,73	5,8 (*)
Bagaço de cana	0,22	2,8	1,84	11,7(*)

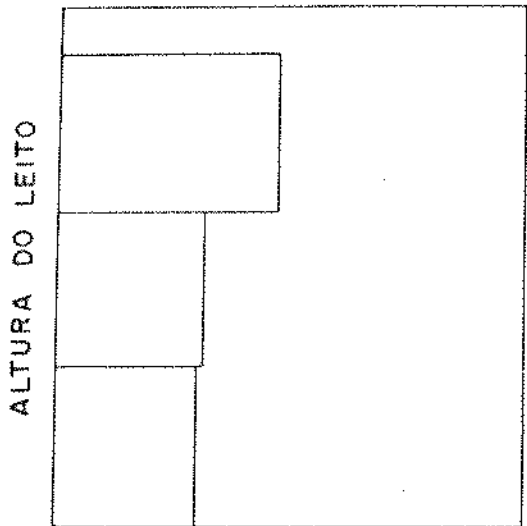
(*) Esses valores irão variar com o grau de compactação do combustível.

Os resultados dos testes de mistura, a frio, realizados com o modelo de vidro estão mostrados na figura 6, onde se apresentam os perfis de distribuição dos diferentes combustíveis dentro do leito.

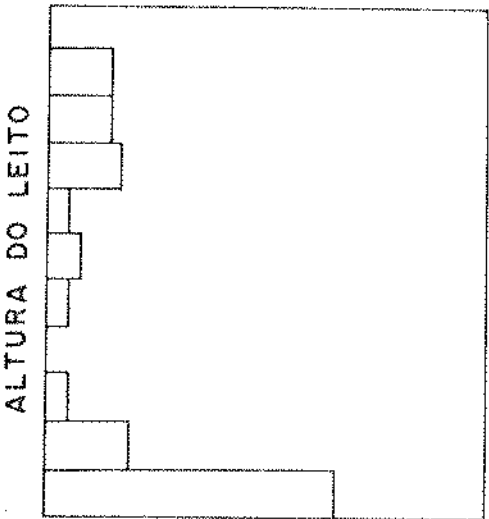
O resultado para carvão mineral mostrou uma forte tendência das partículas maiores de 5 mm serem segregadas ao topo e ao fundo do leito.

Os cavacos de madeira e o carvão vegetal mostraram boas distribuições de massa através do volume do leito, embora ambos os combustíveis tenham apresentado um pequeno aumento nas suas concentrações de massa próximo à superfície.

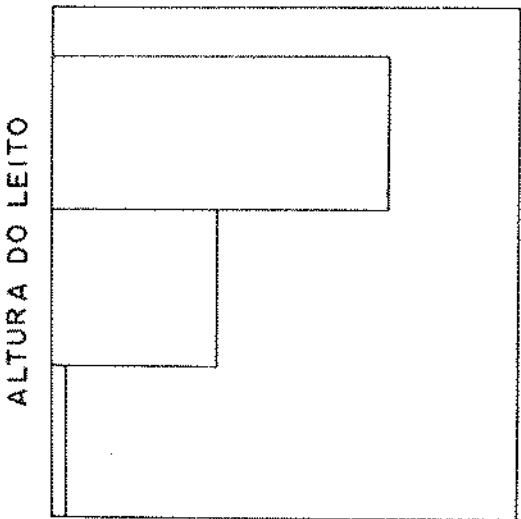
Os sabugos de milho apresentaram uma acentuada tendência à segregação, mostrando uma grande concentração de massa próxima ao topo do leito.



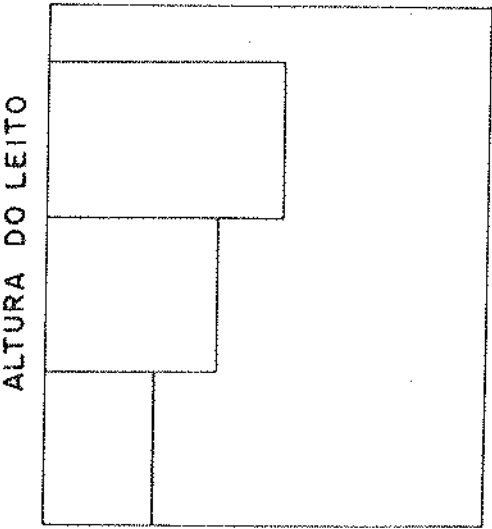
% MASSA - CAVACO DE MADEIRA



% MASSA - CARVÃO MINERAL < 20mm



% MASSA - SABUGOS



% MASSA CARVÃO VEGETAL

a) Testes de combustão sem extração de calor do leito.

a.1. - Carvão mineral

A alimentação de carvão mineral foi realizada no início pela abertura no topo do reator e, posteriormente, através do alimentador de rosca. Como consequência do uso de alimentação por gravidade tornou-se imperativo evitar grandes proporções de finos no carvão alimentado, os quais poderiam ser elutriados pelo gás de saída sem alcançarem o leito de combustão.

A alimentação pneumática não foi usada para o carvão mineral devido à baixa taxa de alimentação mantida nos testes, em geral entre 3,0 e 8,4 kg/h. No entanto, para taxas maiores, este tipo de alimentação não deverá apresentar problemas e o seu uso, injetando-se carvão ao "pé" do leito, permitirá também a alimentação de finos, menores de 1 mm, cuja queima poderá ser completada dentro do leito.

A estabilidade da combustão fluidizada com alto teor de inertes no leito foi decisiva no sucesso da queima de carvão mineral, por dois motivos:

1- O carvão queimado apresentou alto teor de cinzas, cerca de 50% para o carvão vapor de Santa Catarina, contribuindo sempre para a diluição do combustível no leito.

2- No processo de aquecimento, entre 350 e 560 C, o carvão mineral apresenta um comportamento fluido, aglomerante, que

que desaparece após a sua devolatização total. Se a concentração de carvão mineral no leito for alta, será favorecida a aglomeração de suas partículas por contato, provocando a formação de blocos grandes que interromperão a fluidização.

Na tabela III são apresentados alguns dados representativos de testes da combustão de carvão mineral.

Tabela III

Carvão usado - vapor Santa Catarina - % de cinzas = 50

Granulometria	+ 10 mm	2%
e percentual	10-5 mm	19%
de ocorrência	5-2 mm	70%
no combustível	2-0,54 mm	5%
	-0,54 mm	3%
Taxa alimentação	3,0 a 8,4 kg/h, equivalente a 13,9 a 39 Mcal/h	
Velocidade fluidização (frio)	0,215 - 0,30 m/s	
Velocidade de fluidização (quente)	0,80 - 1,38 m/s	
% combustível nos finos do coletor	6,4 - 11,85	

% perda de combustível para o ciclone -0,5

Valores típicos de concentração (% volume) no gás de saída

CO ₂	15-19%
O ₂	0- 5%
CO	0- 1%

A análise cromatográfica dos gases de combustão mostrou a presença de óxidos de enxofre em pequenas quantidades.

Foram feitas comparações de tamanho e de conteúdo de carbono do material do leito para dois testes com carvão vapor de Santa Catarina. Os resultados mostrados na tabela IV, quando comparados entre si e com os dados granulométricos da Tabela III, corroboram a hipótese de que as partículas maiores de carvão são rapidamente fragmentadas produzindo outras menores. Exemplo: na tabela III há 21% de partículas maiores de 5 mm, enquanto na tabela IV essa porcentagem cai para 4,2% na amostra A e para 7,2% na amostra B.

Essa diminuição no tamanho de grão favorece uma distribuição mais uniforme do combustível no leito, modificando, portanto, o padrão de mistura apresentado nos testes frios.

Tabela IV

Tamanho	amostra A	amostra B	% combustível em B
+ 5mm	4,2 %	7,2 %	30,5
5 - 2mm	11,2 %	7,1 %	23,5
2 - 0,59mm	17,1 %	7,8 %	4,8
- 0,59mm	67,0 %	77,9 %	0,25

A amostra A foi coletada ao término de um teste de 2 horas de duração. A amostra B foi coletada durante a combustão, após 3 horas e 10 minutos de teste.

Amostras retiradas do leito durante a operação mostraram uma concentração de 6% de material combustível.

Enquanto não pudemos contar com alimentação contínua, o controle da taxa de alimentação foi um parâmetro crítico na queima do carvão. Isto ocorreu porque:

1- Se o carvão é alimentado com muito excesso, em relação ao oxigênio disponível dentro do leito, os voláteis liberados dentro e acima do leito, em uma atmosfera pobre em O_2 serão carregados pelo gás de saída sem sofrerem combustão completa. A liberação dos voláteis acima do leito, é devida, principalmente, a alimentação por gravidade que coloca, inicialmente, as partículas de carvão sobre a superfície do leito.

2- Se existe excesso de combustível no leito, a alta concentração de carvão pode provocar, como já citado, a aglomeração de partículas de combustível, formando blocos difíceis de serem

fluidizados.

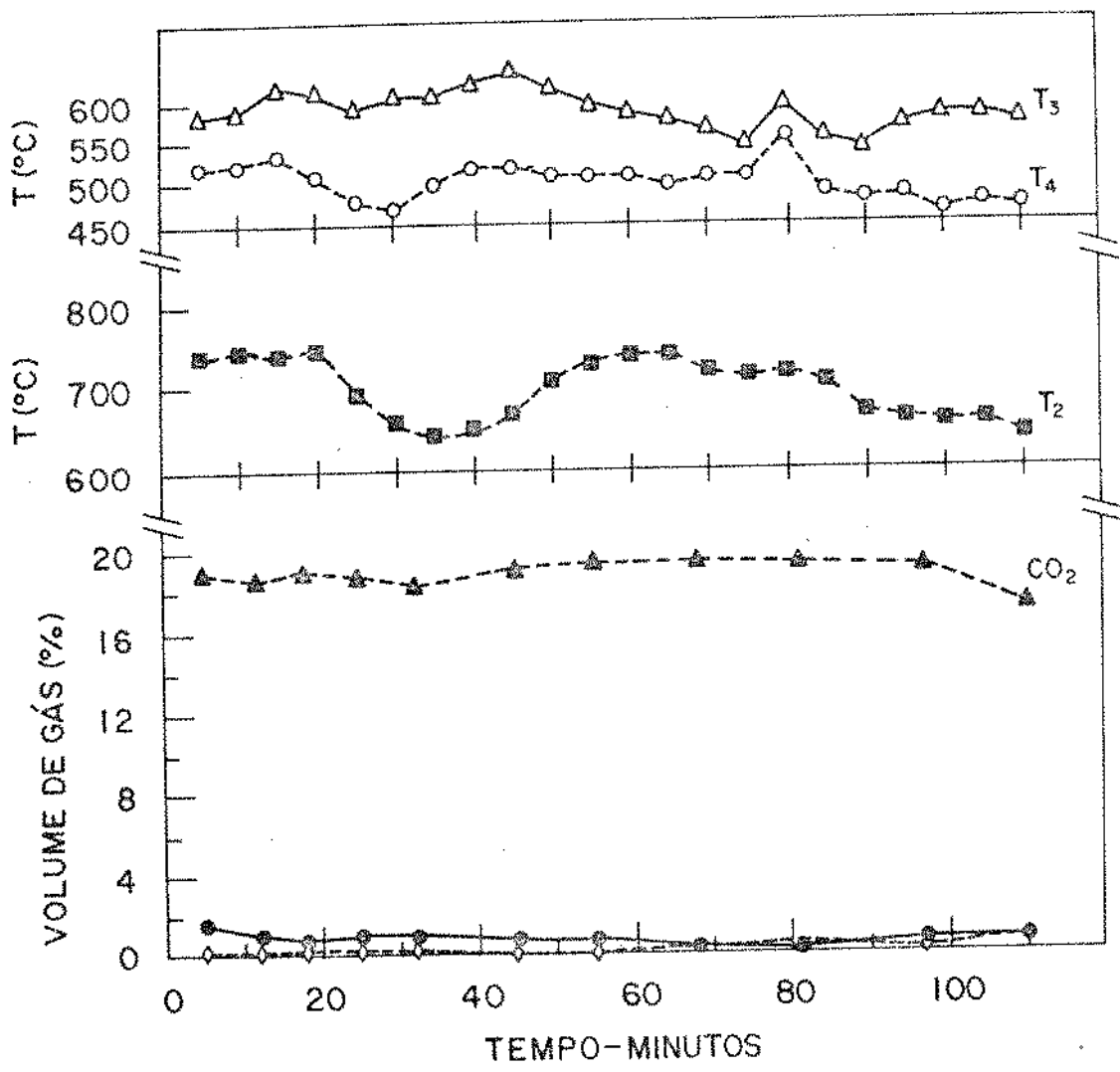
3- Se diminuirmos a taxa de alimentação até condições com bastante excesso de ar, ao mesmo tempo que evitamos o problema da aglomeração, provocamos a diminuição da temperatura de operação tornando mais difícil a ignição dos voláteis.

Esses problemas são facilmente solucionáveis com o uso da alimentação contínua.

Desde que a geração de calor é limitada pelo oxigênio disponível, o controle da taxa de alimentação foi conseguido através da leitura contínua da temperatura do leito e da análise do gás de saída. Os resultados obtidos são analisados através dos gráficos nas figuras 7, 8 e 9, que apresentam dados de três experimentos de combustão de carvão mineral.

Através dos gráficos na figura 7 pode-se notar o efeito da alimentação manual no controle deficiente da temperatura de operação, onde, por vezes, foi necessário utilizar resíduos de carvão vegetal siderúrgico ou carvão ativado como complemento na recuperação rápida de temperatura.

Durante a maior parte do teste, o combustor operou com ligeiro excesso de combustível, provocando uma baixa temperatura de operação e um ambiente, acima do leito, pobre em oxigênio, necessário para a queima dos voláteis liberados no aquecimento do carvão. Isso pode ser notado nos baixos valores de temperatura acima do leito, entre 640 e 470 C e também pelo baixo conteúdo de O_2



no gás de combustão. Afora as variações de temperatura, devidas ao controle deficiente da taxa de alimentação, a combustão foi estável, mesmo a temperaturas relativamente baixas (650-750 C).

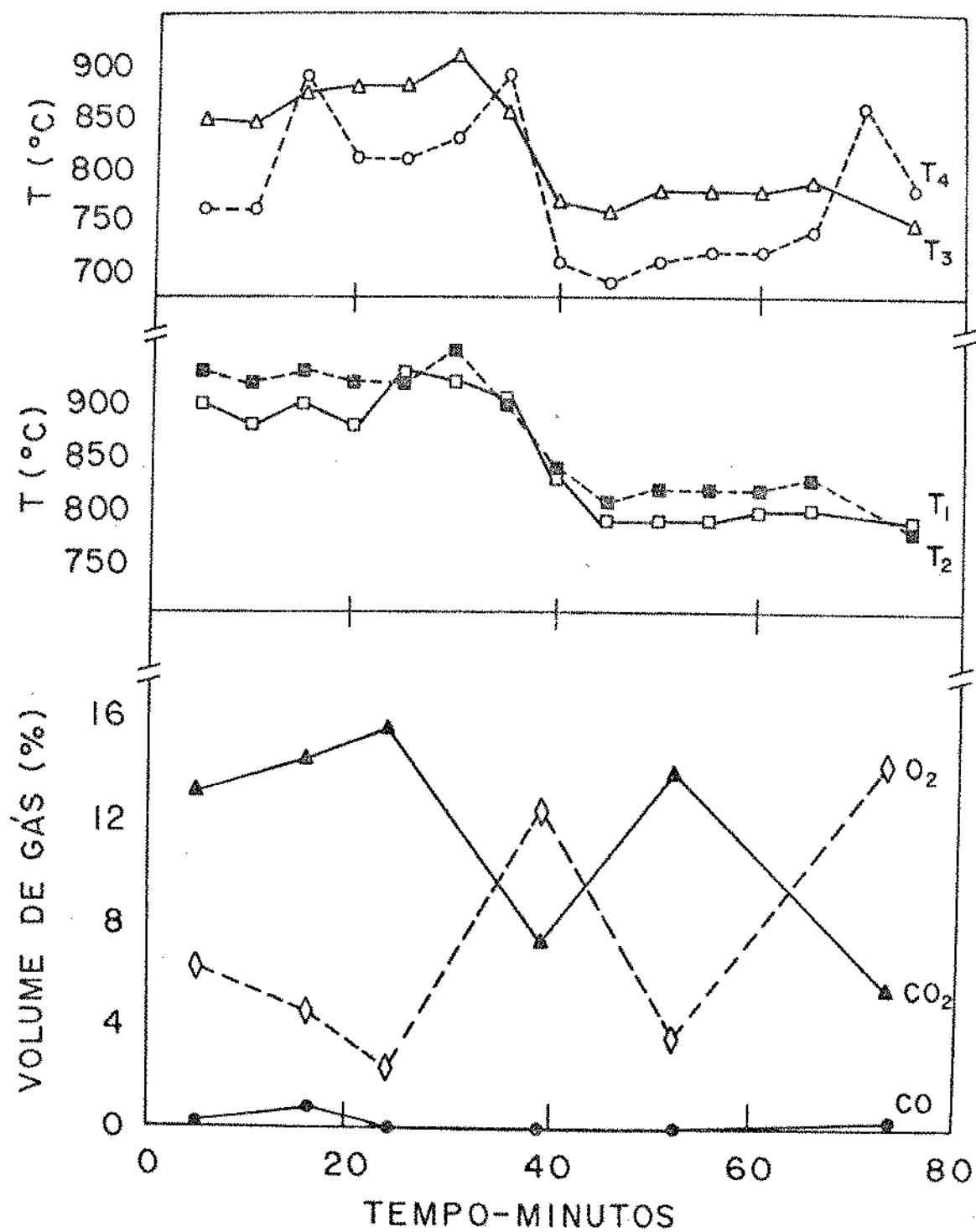
Embora não automática e necessitando o uso de um operador, a alimentação contínua com o alimentador de rosca, permitiu fazermos variações controladas da temperatura de operação (fig. 8). Nos gráficos da temperatura dentro do leito (T_1 e T_2), podem ser notados dois períodos distintos de operação: um com temperatura média de operação de 900 C e outro com temperatura em torno de 800 C. A variação de temperatura entre os dois períodos foi voluntária, conseguindo-se um controle eficiente da temperatura do queimador, dentro de uma faixa de 50 C.

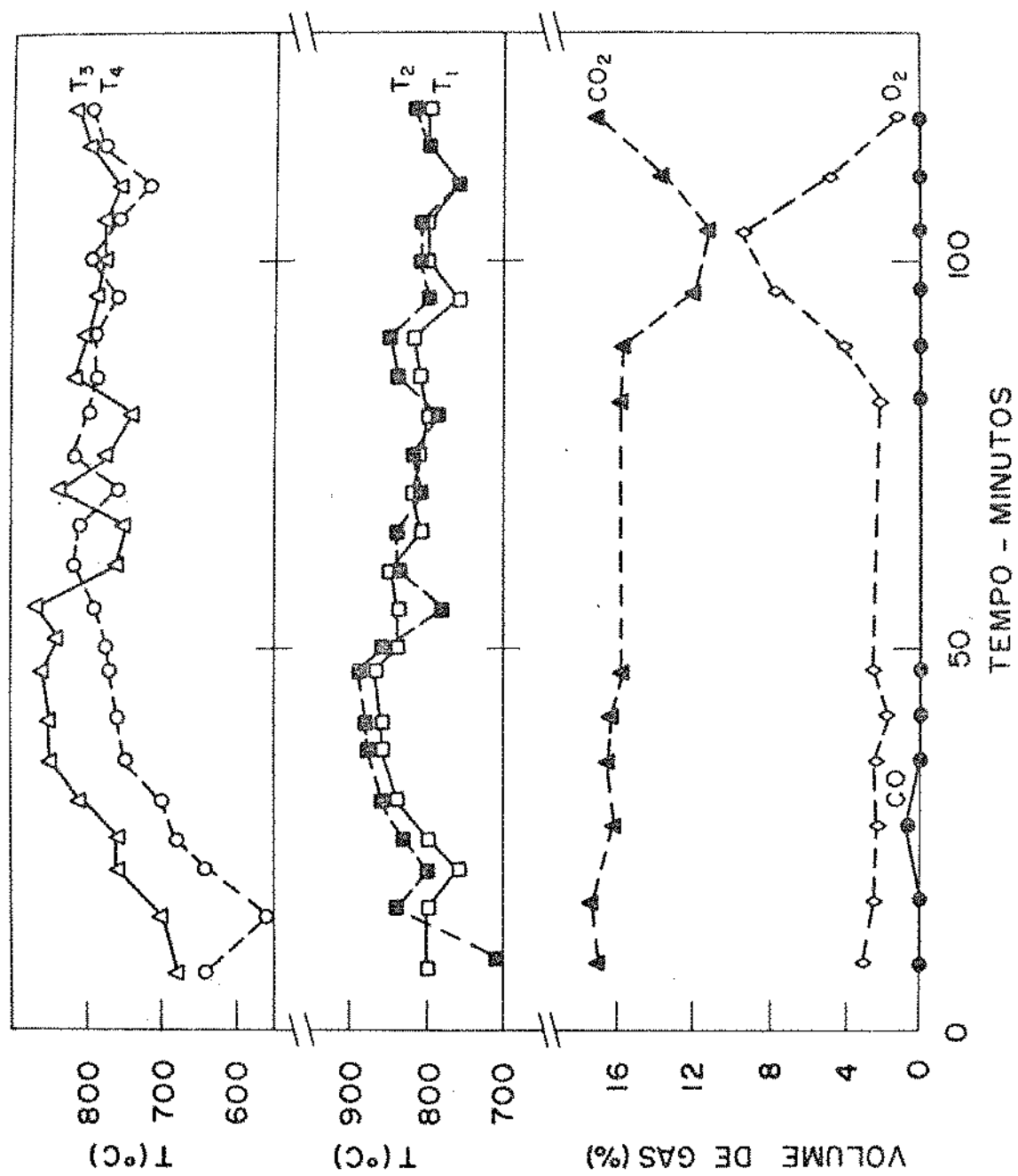
A operação do leito entre 800 e 900 C e o ar em excesso da ordem de 30% permitiu a queima dos voláteis dentro e acima do leito, verificando-se, como consequência, que as temperaturas dentro e acima do mesmo apresentaram valores da mesma ordem.

A figura 9 nos mostra o resultado de um teste de 2 horas, realizado com alimentação contínua por rosca. O leito foi operado com uma velocidade de fluidização menor e com apenas 12% de excesso de ar, também suficiente para a queima completa de voláteis. O controle da taxa de alimentação indicou uma potência efetiva de 43,2 Kw, equivalente a 3 Mw/m^3 para o volume do leito.

Durante este teste nós pudemos observar uma prova direta da importância da análise de gás, no controle da combustão: nos instantes em torno dos 100 minutos de teste, podemos ver que uma falha na alimentação foi mostrada mais rapidamente pela medida da % O_2 no gás de saída do que pela variação de temperatura.

A medida do material inerte alimentado e dos inertes ao





final das duas horas de operação do queimador mostraram um acúmulo significativo de cinzas no leito, indicando a necessidade de um sistema extrator de cinzas para períodos mais longos de operação.

a.2. - Carvão vegetal ativado:

O carvão ativado, foi o combustível entre todos os testados para o qual o reator de combustão fluidizada apresentou a melhor performance. Possui alto poder calorífico, baixo teor de umidade e de cinzas; e é constituído quase totalmente de carbono fixo (cerca de 91% em base seca). Sua estrutura muito porosa, o torna altamente reativo.

Como esse carvão não apresenta propriedades aglomerativas, pode ser queimado no leito, a concentrações de até 100%. A sua apresentação em tamanhos selecionados de grãos (2-4, 4-6, e 6-10mm) e o baixo teor de voláteis, resultou sempre em uma combustão limpa.

Essas propriedades tornaram vantajosa a sua utilização, primeiramente como um combustível padrão no estudo da operação do leito e depois como combustível usado no processo de ignição de praticamente todos os testes.

O principal uso do carvão ativado, ocorreu na sua queima em experimentos com variação da concentração de carbono no leito, nos quais foi usado em diferentes granulometrias.

Foi observado no início de todos os testes, de variação da concentração de carbono no leito, que a soma das medidas, % em volume, de CO_2 , O_2 e de CO , no gás de saída do reator não totalizava os 21% do oxigênio entrante no ar de fluidização. A razão para essa discrepância esta no fato do carvão ativado possuir pouco mais de 2% de H_2 na sua composição que são despreendidos

com o aquecimento do combustível. A devolatização do hidrogênio afeta as medidas por efeito de diluição da mistura gasosa e também pela reação com o oxigênio, formando água, a qual não é registrada pelo Orsat.

A não ocorrência desse desvio nas medidas após o período de devolatização do hidrogênio indica que o combustível no leito é exclusivamente carbono.

Em um processo de combustão, as perdas energéticas que prejudicam o rendimento do reator podem ser listadas como:

1- Energia perdida no aquecimento do reator; no entanto, como se pretende operar o reator contínuo por longos períodos de tempo, essa energia se torna desprezível ao longo da operação.

2- Energia perdida no calor carregado no gás de combustão.

Será tanto menor quanto menor for a temperatura com que são lançados os gases. Como essa perda é uma constante durante todo o funcionamento do combustor, devemos utilizar recuperação do calor, diminuindo a temperatura dos gases.

3- Perdas por radiação do corpo do reator.

É também uma perda importante, pois se mantém durante a operação. Deve ser minorada com isolamento térmico.

4- Elutriação de carbono e de cinzas do leito.

O carbono elutriado leva consigo energia não liberada na sua combustão e também o calor roubado no aquecimento de sua massa, enquanto as cinzas levam apenas o calor de seu aquecimento. Se o combustível contém muitos finos, deverá ser feita a recir-

culação do material elutriado e, se possível, recuperar o calor de suas cinzas.

5- Produção de CO.

A presença de CO no gás de saída, no processo de combustão, é responsável pela perda de 67,9 kcal/mol de CO. Deve-se impedir a sua formação, evitando-se as condições que favorecem o seu surgimento.

Das perdas mencionadas, nós nos preocupamos principalmente com a produção de CO, que foi utilizada como coeficiente de otimização da combustão.

Foi observado nos experimentos que a produção de CO está relacionada com a operação do leito a baixas temperaturas, com o tamanho de partículas e com a concentração de carbono no leito.

O efeito do tamanho das partículas foi observado durante testes com carvão de diferentes granulometrias, sendo que os resultados mostraram que a produção de CO diminuiu com o aumento do grão de carvão. Tal efeito está associado à espessura da camada limite em torno da partícula (8). Dentro de um certo intervalo, o aumento do grão de combustível implica no aumento da espessura da camada limite, que permite a oxidação do CO a CO₂ dentro dessa camada.

Partículas menores possuem camadas mais estreitas e possibilitam que o CO formado na superfície do combustível seja carregado na corrente de gás, para um ponto onde sua queima é mais incerta, devido à menor temperatura e à deficiência de oxigênio.

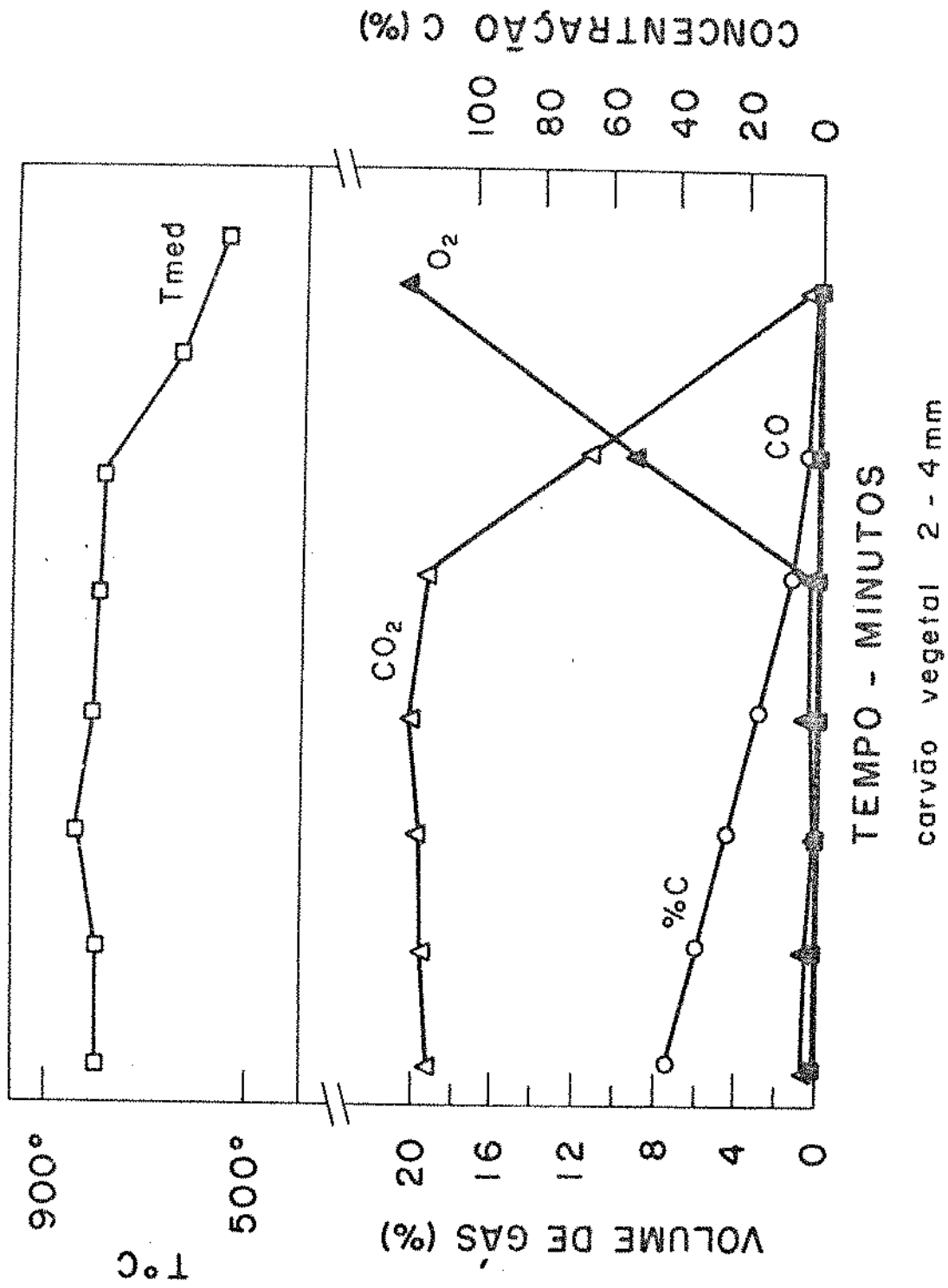
O efeito da temperatura se fez notar por um aumento na % de CO correspondente a uma diminuição da temperatura abaixo de 800 C até 450 C.

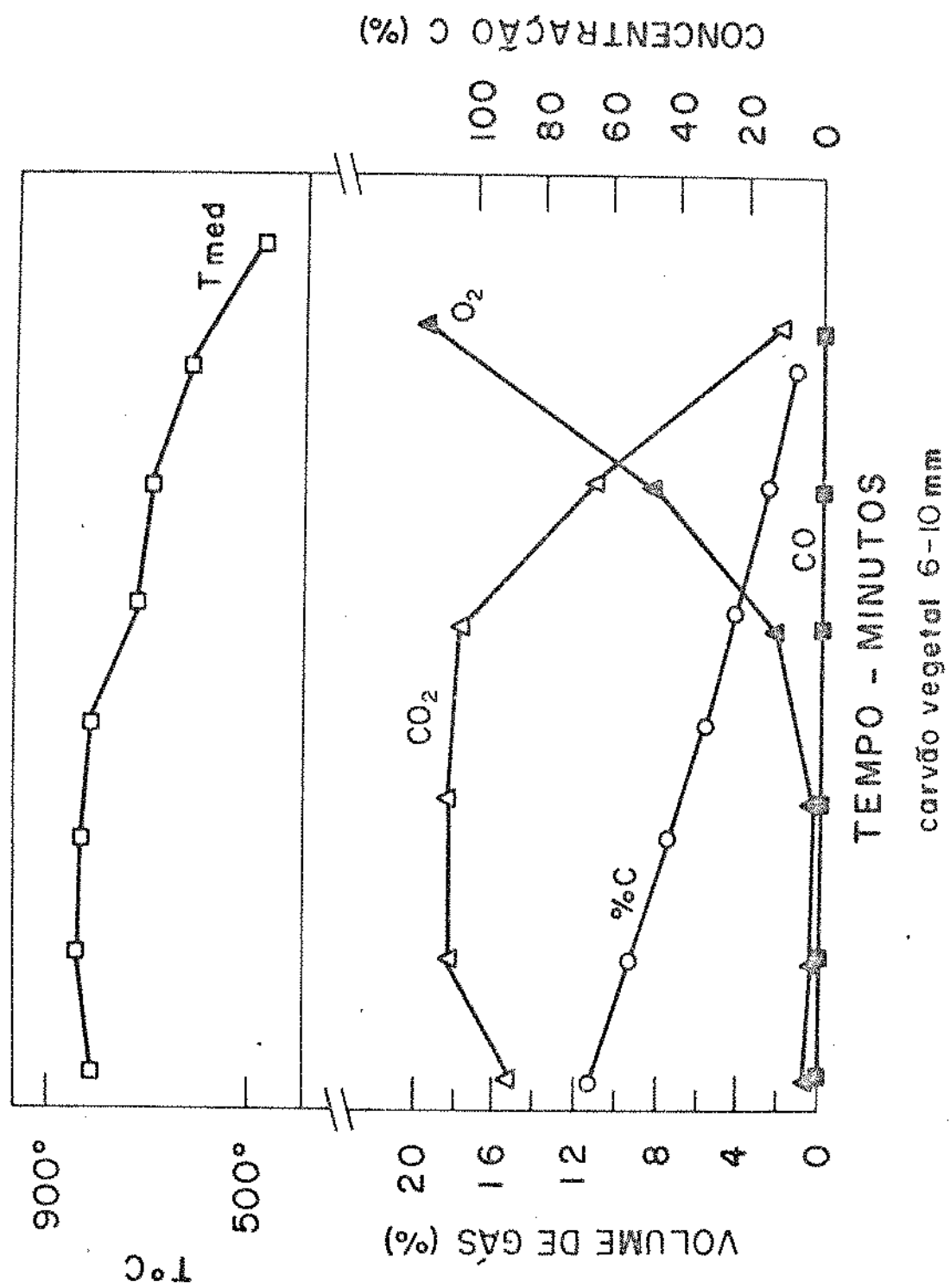
Pode também ser observado que, mesmo para temperaturas da ordem de 800 C, um aumento de duas vezes na concentração de combustível implicou em aumentar a concentração de CO em 4,5 vezes.

Foi também observado (Fig. 10 e 11) na combustão de tamanhos diferentes de partículas que:

1- A mudança da alimentação de carvão de grãos pequenos para carvão de grãos maiores, tornou necessário aumentar a concentração de carvão no leito, para se manter a mesma taxa de combustão. Esse aumento, já esperado, foi devido ao fato da área superficial, disponível para a reação de combustão, diminuir com o aumento no tamanho do grão.

2- A estabilidade da combustão melhorou com o aumento no tamanho do grão, devido ao aumento na concentração de carvão no leito e ao fato de que, com partículas maiores, o processo de esfriamento da partícula que conduz a extinção da combustão, é mais lento, por dispor de menor área de troca de calor entre combustível e o material do leito.





a.3. - Resíduos de carvão vegetal siderúrgico

São obtidos da fabricação de carvão vegetal para a siderurgia. O processo de obtenção consiste na carbonização de madeira (eucalipto) em uma atmosfera pobre em oxigênio, onde a madeira sofre intensa devolatização.

Não obstante o processo de fabricação, os resíduos testados no reator possuíam um conteúdo de voláteis entre 16 e 30% (tabela 1).

Ainda resultante do processo de fabricação, foi observada a presença de barro cozido das paredes do forno de carvão que alteram o conteúdo, normalmente baixo, de cinzas no carvão vegetal.

O combustível, no estado em que foi recebido, continha uma quantidade considerável de finos menores que 2mm, os quais foram separados por peneiras para evitar sua elutriação. Após a separação o carvão ficou com granulometria entre 2 e 50mm.

Os resíduos de carvão siderúrgico, assim como o carvão ativado, revelaram-se excelente combustível tendo, inclusive, substituído o uso dos finos de carvão ativado no processo de ignição quando selecionado entre 2 - 3 mm. Sua combustão ocorreu sempre livre de fumaça apesar do seu conteúdo de voláteis. Foi observado que quando se alimenta pedaços maiores de 4mm, ocorre uma forte decrepitação do combustível dentro do leito acompanhada da emissão de finos.

O carvão siderúrgico apresentou boa controlabilidade e estabilidade de combustão em grãos grandes (10 - 50 mm) mesmo em con

dições de leito raso com cerca de 100 mm de profundidade.

Não foi verificada a ocorrência de CO em nenhum dos testes realizados dentro dos limites de medida do Orsat (0,2%). Esta ausência deve-se ao efeito já citado do tamanho da partícula sobre a produção de CO e também à baixa concentração do combustível no leito.

Foi observado que para as mesmas condições de vazão de ar e de temperatura de operação o registro da temperatura acima do leito apresentou para o carvão siderúrgico valores sempre superiores aos obtidos durante a queima do carvão ativado: a saber, $T_4 = 800^{\circ}\text{C}$ para combustão de carvão siderúrgico e da ordem de 400°C para o carvão ativado.

Essa diferença é devida principalmente aos diferentes conteúdos de matéria volátil para um e outro combustível, lembrando-se que existe uma estreita relação entre o conteúdo de matéria volátil e a reatividade, visto que a maior reatividade do carvão ativado é conseguida após a sua total devolatização que produz uma estrutura muito porosa, ou equivalentemente, uma área superficial interna muito extensa.

Nas condições do reator o carvão ativado (mais poroso) irá consumir uma quantidade maior do O_2 disponível para combustão dentro do próprio leito; acima deste restará uma mistura de gases pobre em oxigênio, inadequada a qualquer processo posterior de combustão.

O carvão siderúrgico (menos poroso e com menor área superficial disponível para combustão) irá consumir uma porção menor do

O_2 disponível resultando, portanto, que os voláteis liberados parcialmente fora do leito encontrarão aí uma atmosfera com O_2 suficiente para sua combustão provocando a elevação da temperatura local.

Em um reator termicamente isolado o efeito dos voláteis ou da reatividade sobre a temperatura acima do leito seria menos notado.

Quando alimentamos carvão em pedaços de 15 a 50 mm eles podem ser ocasionalmente observados na superfície e aparecem mais escuros que o leito durante 1 a 2 minutos após a sua alimentação. Este aquecimento lento da partícula foi confirmado nos experimentos com o mini-leito (figura 5). Foram também observadas partículas grandes brilhando mais intensamente que o leito. Isso ocorreu para situações de operação do leito mesmo com temperaturas de $800^{\circ}C$ e foi mais notável em situações de fim de teste quando após o final da alimentação as partículas persistiam queimando apesar da rápida queda de temperatura; nesta situação os grãos de combustível permaneciam queimando mesmo quando o leito já se encontrava totalmente escuro com temperatura cerca de $400^{\circ}C$.

A observação do movimento das partículas brilhantes em um leito escuro mostra-nos também a qualidade da mistura inerte-combustível através do surgimento ocasional de partículas que podem ser identificadas por suas dimensões.

a.4. - Cavacos de madeira

Os cavacos de madeira usados em nossos testes foram obtidos de um picador utilizado na indústria de papel e celulose. Embora os cavacos tenham sido queimados sem nenhuma secagem posterior à sua passagem pelo picador, mesmo assim apresentaram boa queima em nosso reator.

Para um valor de 35% de umidade encontramos em cada kg de madeira cerca de 0,350 kg de água e 0,551 kg de matéria volátil e 0,099 kg de carbono fixo. Esses valores explicam parcialmente a dificuldade encontrada em manter uma combustão limpa, sem fumaça quando trabalhamos com leito raso (cerca de 100 mm). Essa dificuldade deveu-se também em grande parte a falta de um alimentador adequado para cavacos, o que impossibilitou uma alimentação contínua.

A combustão de madeira em cavacos apresentou bastante melhora quando o reator foi operado com alturas maiores do leito. Dadas as boas condições de mistura dos cavacos no leito mostrada nos testes com o modelo de vidro (figura 6); o aumento da altura implica em uma distribuição mais uniforme dos cavacos fazendo com que uma parte maior do combustível sofra devolatização (e consequente queima) dentro do leito.

Além da influência da altura do leito foi também observado o efeito da velocidade de fluidização sobre a queima. Uma melhor apreciação dos efeitos da altura do leito e da vazão sobre a combustão pode ser obtida através dos gráficos nas figuras 12, 13,

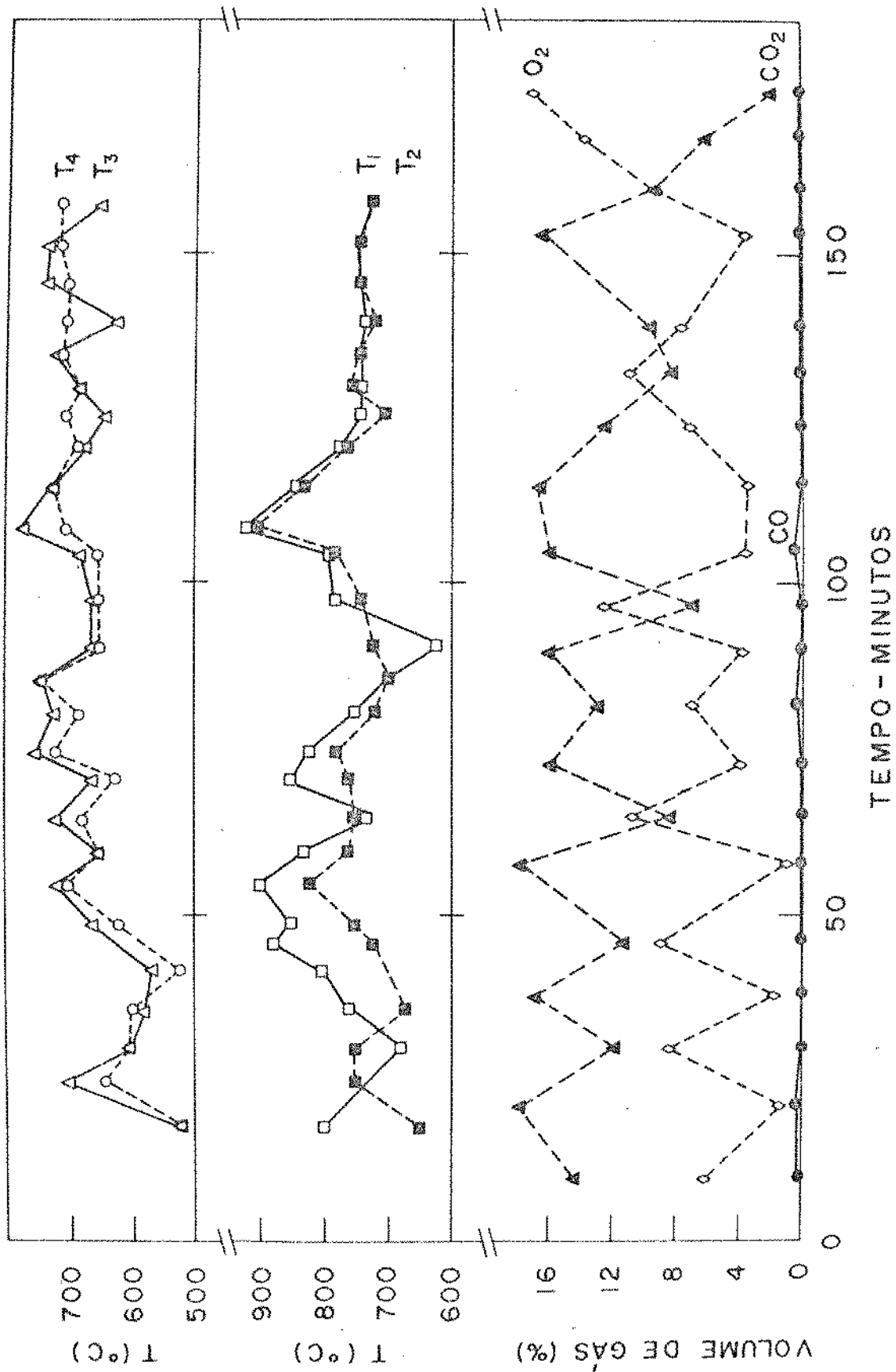
e 14 mostradas a seguir.

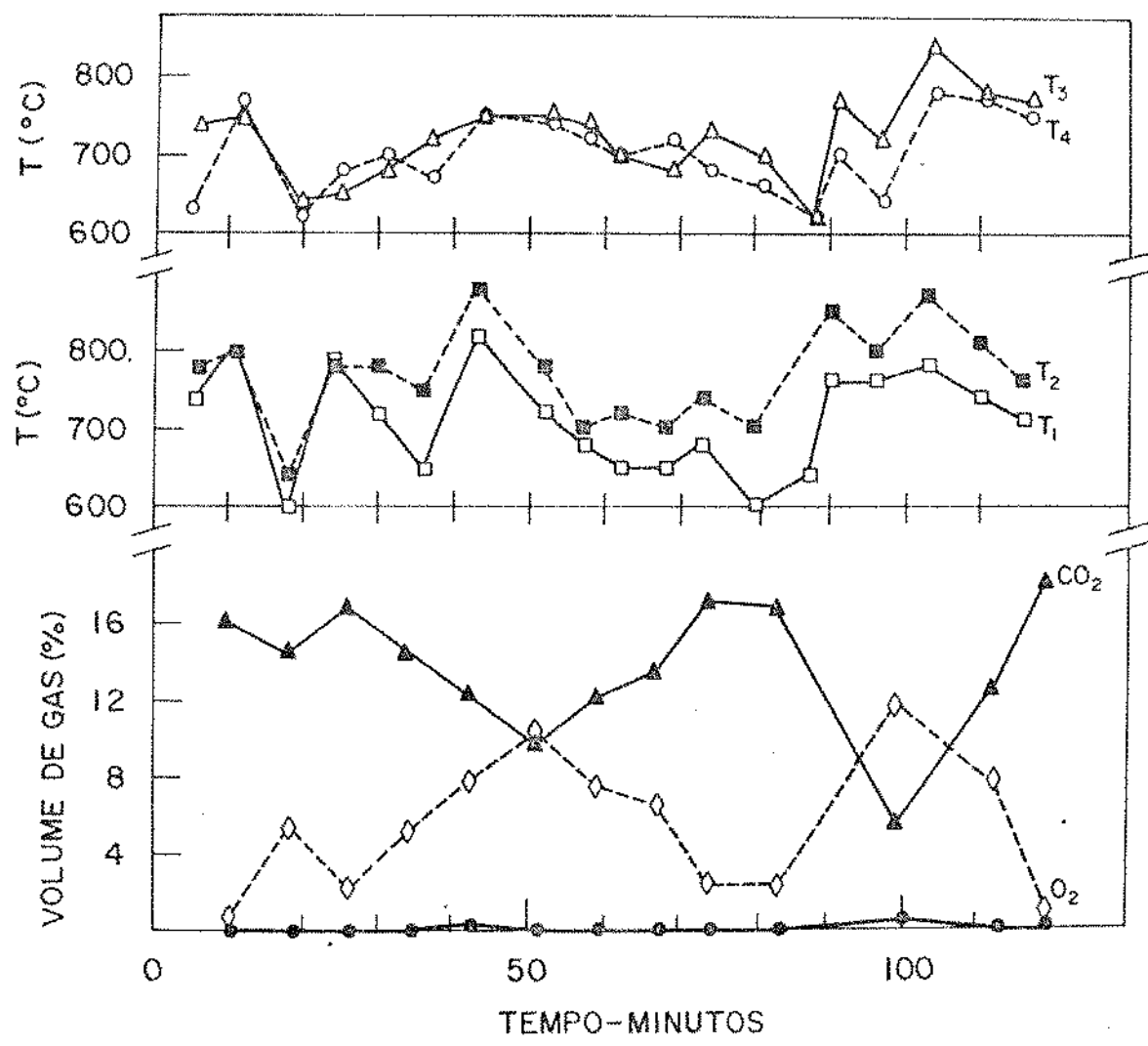
A figura 12 corresponde ao experimento de 15/04/80 realizado com uma vazão de ar de 10,6 g/s (velocidade a quente = 0,98 m/s). O teste foi iniciado com leito raso, cerca de 1000 cm³ em medida compacta e sofreu adições sucessivas de areia ao leito durante o seu transcorrer variando-se assim a altura do leito. Foi notado desde o início até pouco mais da metade dos testes que as variações de temperatura foram bruscas enquanto que nos últimos 30 minutos com o leito já formado e com boa altura a variação foi muito pequena.

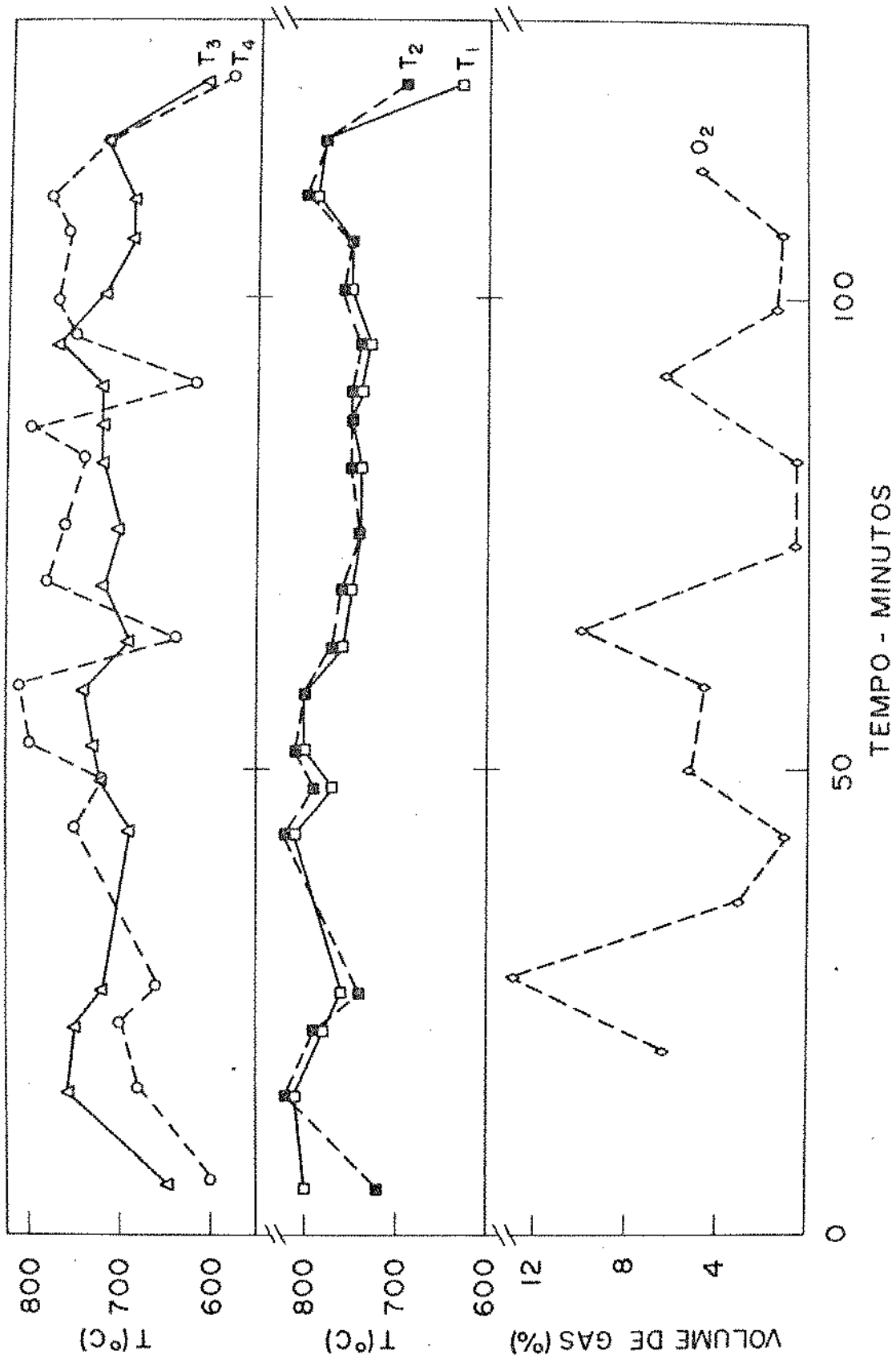
A figura 13 dos testes de 25/04/80 corresponde a um teste com vazão de 13,2 g/s (velocidade a quente = 1,22 m/s). Também este experimento foi iniciado com leito baixo cuja altura foi incrementada com adições de areia. Comparado ao teste anterior pode ser notado o efeito favorável da maior vazão através das variações menos bruscas de temperatura durante todo o período de combustão devido principalmente a melhor distribuição de massa de combustível no leito.

Nesses dois testes realizados com variação do volume do leito, foi observado visualmente a diminuição da quantidade de chamas acima do leito como uma função do aumento da sua altura.

Na figura 14, teste de 22/05/80, o reator foi operado com volume do leito constante e igual a 4 litros (medida compacta) que foi o valor final utilizado nos dois testes anteriores e a vazão escolhida foi 10,6 g/s (velocidade a quente = 1,00 m/s). Neste experimento o efeito de um leito alto desde o início se



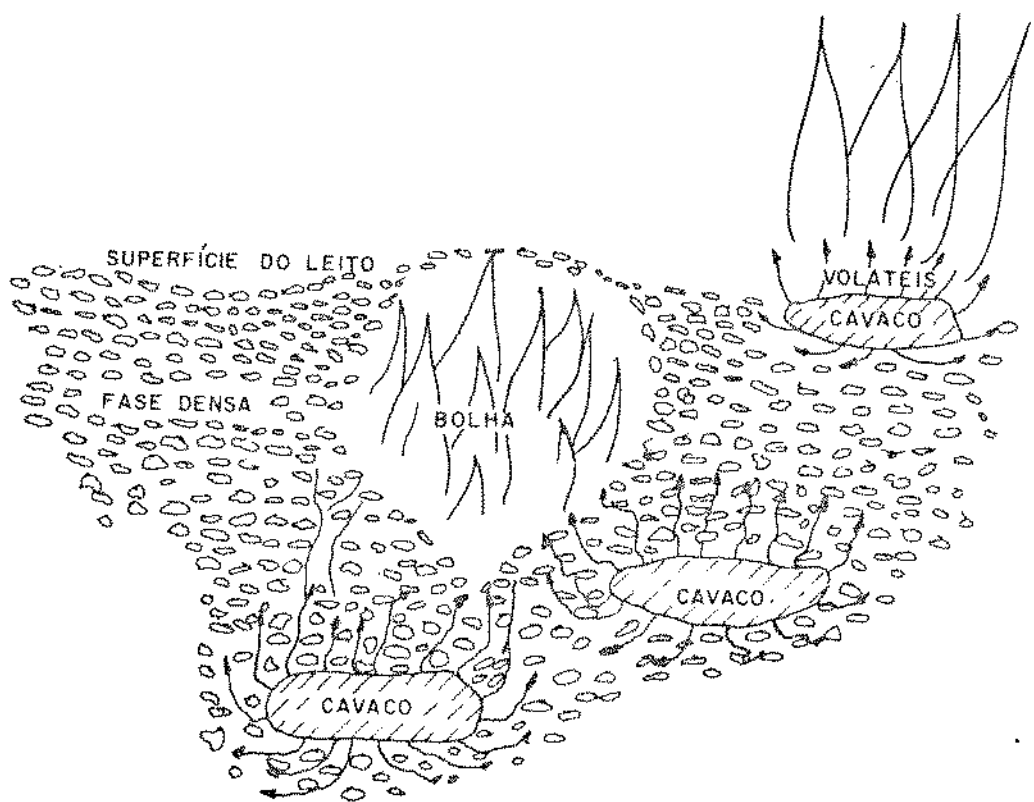




fez notar pela boa estabilidade da temperatura dentro do leito. Como desta vez a vazão foi igual a do teste de 15/04/80, parte das variações bruscas de temperatura, observadas nas figuras 12 e 13, devem ser atribuídas ao próprio fato das variações discretas da altura do leito efetuadas durante o período de combustão.

Ainda com relação a figura 14, nesse teste foi usado ar secundário acima do leito, cujo efeito foi permitir a observação da variação de temperatura acima do leito como uma função da presença de voláteis queimando. Esse fato pode ser analisado comparando-se os decréscimos de T_4 acima do leito, com os picos de máximo nos valores das concentrações de O_2 no gás de saída. Os picos de máximo coincidiram com os instantes de ausência ou diminuição de chamas acima do leito.

Quando se alimenta uma carga de cavacos ao reator, ocorre sempre a presença de chamas fortes, no espaço livre acima do leito de combustão. Essas chamas estão associadas com uma devolatilização inicial mais intensa e que dura cerca de 30 segundos. Após esse tempo, e não alimentando nova carga de combustível, aparecem apenas chamas ocasionais na superfície do leito; que estão aparentemente associadas com a chegada a superfície, de um cavaco devolatilizando e, ou, com a erupção de uma bolha contendo chamas de voláteis que são liberados dentro do leito (figura 15).



a.5. - Sabugo de Milho

A alimentação de sabugo foi feita manualmente ao topo de reator apresentando um pouco de dificuldade devido ao tamanho axial médio das partículas alimentadas ser da mesma ordem do diâmetro da abertura para alimentação. Como consequência a taxa de combustão de sabugos (36 kw) foi limitada pela taxa máxima de alimentação.

A combustão de sabugo se assemelha em muitos aspectos, à de cavacos de madeira; no entanto foi observado que o processo de devolatilização inicial intensa, (perceptível pela presença de chama forte acima do leito) é mais demorado com sabugos. As chamas acima do leito persistem durante 2 - 3 minutos após a alimentação do combustível. A diminuição das chamas permitiu a observação do resíduo carbonoso do sabugo, visivelmente mais quente que o resto do leito.

Novamente em relação a combustão de cavacos de madeira e também de resíduos de carvão siderúrgico; foi observada uma queda mais rápida da temperatura do leito; ao final da alimentação com sabugos.

Uma possível explicação para esse comportamento, está na má distribuição dos sabugos dentro do leito, mostrada nos testes de simulação a frio (figura 6). Tal suposição foi parcialmente confirmada em testes comparativos, da combustão de sabugos e cavacos em leito raso, quando todo combustível fica próximo a borda do leito. Esses testes mostraram para a madeira uma devolati

zação mais intensa e demorada que diminuiu em intensidade e duração à medida que se elevou a altura do leito provocando devolatização (e consequente queima) interna ao leito por efeito de uma melhor distribuição dos cavacos no seu volume.

Para os sabugos com a elevação do leito foi observada uma diminuição na intensidade das chamas sem que ocorresse no entanto, uma mudança significativa no tempo de devolatização indicando que a distribuição de massa de combustível no leito ainda segue o mesmo padrão mostrado nos testes frios com o simulador. Para um combustível com 86% de matéria volátil, como o sabugo, isso implica que parte da energia da combustão (talvez 20%) pode ser liberada para o aquecimento dos gases de saída e das paredes do reator e não sendo aproveitada para o aquecimento do leito.

Outra hipótese é que devido a macroporosidade presente nos sabugos a devolatização tem uma taxa constante do início ao fim do processo de combustão, que é também favorecida pelo rápido aquecimento mostrado nos testes com o mini-leito (figura 17). Os macro-poros além de facilitarem a perda de voláteis também permitiriam o fluxo de O_2 para reação interna à partícula ao mesmo tempo em que ocorre a combustão superficial externa segundo o modelo de Beēr (10).

Na madeira a combustão é mais lenta devido a presença de poros menores que além de retardarem a saída dos voláteis também impedem o acesso de O_2 às superfícies internas.

Podemos concluir que para madeiras tanto a devolatização como a combustão são processos eminentemente superficiais externos,

enquanto para o sabugo, a combustão e devolatização ocorrem com intensidade nas superfícies interna e externa das partículas.

Essa hipótese também explicaria a queda mais rápida de temperatura ao final da alimentação dos sabugos: se a superfície de reação é maior a taxa de combustão na presença de oxigênio disponível será mais alta e o combustível no leito é consumido mais rapidamente.

a.6. - Bagaço de cana, casca de arroz e serragem

Bagaço de cana, casca de arroz e serragem são combustíveis potencialmente bons para um queimador de leito fluidizado que no entanto não conseguimos queimar com sucesso em nosso reator. O maior problema para cada caso foi sempre a alimentação do combustível ao leito, e, ou mantê-lo dentro do leito tempo suficiente para que sua combustão se completasse.

O uso da alimentação por gravidade fez com que o bagaço e a serragem sofressem ignição antes de alcançarem o leito, provocando a combustão da maior parte do combustível no espaço livre acima dele. Quando isso ocorre, pouco calor é fornecido ao leito que sofre resfriamento. Como o leito é fonte de ignição do combustível, seu esfriamento pode acarretar a perda da combustão.

O bagaço não pode ser alimentado pneumaticamente ou por rosca porque se apresenta com partículas longas e fibrosas. Os testes com o modelo de vidro mostraram que ele pode ser misturado com o material do leito sem sofrer elutriação, portanto é possível que sua queima ocorra com sucesso desde que os problemas com sua alimentação sejam resolvidos, talvez em um queimador maior.

Embora de maneira não muito constante, a serragem pode ser alimentada pneumaticamente, no entanto, devido à elutriação, a maior parte de sua combustão ocorreu acima do leito, mesmo quando a serragem foi alimentada abaixo de sua superfície. Testes com o simulador de vidro mostraram que a serragem somente poderá

ser uma boa opção para um combustor fluidizado se for compactada ou queimada em um leito fluidizado onde a elutriação é aceitável (7).

A alimentação por gravidade para cascas de arroz mostrou que, ao mesmo tempo que ocorre muita chama acima do leito, a sua temperatura foi mantida indicando assim que parte do combustível estava queimando dentro do leito. Foi realizado um curto teste com cascas de arroz, utilizando alimentação pneumática, conseguindo-se uma boa combustão, mas foi interrompida com o surgimento de bloqueios e ignição do combustível dentro do alimentador devidos a baixa taxa de alimentação.

Testes com o modelo de vidro mostraram facilidade na obtenção de boa distribuição das cascas de arroz através do volume do leito sem maiores problemas com elutriação. Conclui-se, portanto, que, com um alimentador adequado, as cascas de arroz poderão ser um bom combustível.

b) Propriedade dos combustíveis vegetais

b.1. Tamanho das partículas

O tamanho das partículas dos combustíveis que têm sido queimados com sucesso em nossos reatores de leito fluidizado, tem variado desde 2 mm até partículas com 130 x 25 mm de diâmetro, no caso de sabugos de milho, sendo que a dimensão maior destes últimos é da mesma ordem do diâmetro das bolhas no leito.

Foi observado no modelo de vidro que os sabugos permanecem grande parte de seu tempo de queima em contato com as bolhas. Presumivelmente, estas partículas irão reagir com o oxigênio das bolhas, tanto quanto com o oxigênio na fase densa. Se os tempos de contato partícula/bolha e partícula/fase densa, estão na mesma razão que volume da partícula na bolha/volume da partícula na fase densa e se as taxas de reação nas duas fases são similares, então a concentração de oxigênio nas duas fases deverão ser iguais.

No entanto, desde que a superfície das partículas são mais resfriadas na fase densa, sua temperatura e, conseqüentemente, a taxa de reação poderão ser reduzidas enquanto aí estiverem. Por isso, se todas são de tamanho semelhantes aos das bolhas e possuem inércia tal que o movimento das bolhas não as confina à fase densa, então a fase de bolhas deverá ter uma concentração de O_2 (C_b) menor que a concentração de O_2 (C_p) na fase de partí-

culas, contrariando o suposto para a combustão de partículas pequenas.

Contudo, em uma situação normal, haverá também no leito, a presença de partículas finas formadas pelo desgaste no atrito com o leito pela combustão parcial ou pela quebra das partículas maiores e estas irão reagir com o oxigênio na fase densa da maneira similar à descrita por Avedesiam e Davidson.

Se a taxa de geração de calor no leito é uma função da temperatura e da área superficial disponível para reação e desprezando-se a porosidade das partículas e a combustão da matéria volátil dentro do leito; isto irá requerer que, para uma mesma taxa de combustão, a proporção de massa de combustível no leito será maior para partículas maiores e conseqüentemente que a quantidade de massa necessária para produzir um dado aumento de temperatura também será maior, provocando uma resposta mais lenta na variação da temperatura.

Essa lentidão no aumento da temperatura devido a um aumento na taxa de alimentação para partículas grandes foi observada durante nossos experimentos.

b.2. Densidade de partícula

Os combustíveis vegetais têm densidades menores que a do carvão mineral (Tabela I), contudo, durante os testes no modelo de vidro, com velocidades da ordem de 1,2 m/s, foi observada

a obtenção de boa mistura entre as partículas de combustível e a areia do leito (Fig. 6).

Mesmo os sabugos de milho que não apresentaram boa mistura, queimaram bem, nos testes de combustão.

No entanto, a combinação de baixa densidade e tamanho pequeno, poderá gerar dificuldades como no caso da serragem, a qual sofreu séria elutriação, mesmo a velocidades abaixo daquela necessária para obtenção de boa mistura.

b.3. Matéria volátil

A devolatização dos combustíveis vegetais é grandemente endotérmica e uma grande parte da matéria volátil é água, mas os voláteis possuem cerca de 60% do poder calorífico do combustível, requerendo cerca desta proporção do oxigênio estequiométrico na sua combustão, enquanto o resíduo carbonoso irá requerer os restantes 40%. O calor produzido pela combustão do sólido irá ser distribuído entre o material do leito e o gás de saída que abandona o leito, com uma temperatura aproximadamente igual.

Se os voláteis forem queimados dentro do leito, o calor liberado na sua combustão irá ser distribuído semelhantemente. Alternativamente, se os voláteis queimam acima do leito a maior parte de sua energia será fornecida aos gases de saída, sendo transferida para o leito, apenas por radiação e pela convecção de partículas ejetadas do leito, aquecidas acima dele e que retornam

ao seu volume.

Por analogia com a combustão de gás em leito fluidizado, parece improvável que a matéria volátil irá queimar dentro do leito a temperaturas abaixo de 730 °C, a menos que, como parece ocorrer com cavacos de madeira, os voláteis permaneçam em contato com uma partícula incandescente a qual age como uma fonte de ignição.

A presença de oxigênio em excesso acima do leito pode ser deduzida quando partículas de combustível ejetadas brilham mais intensamente a temperaturas maiores que as do leito. Foi observada a coexistência de O_2 em excesso e chamas acima do leito e também com a formação de fumaça. A presença de O_2 em excesso e voláteis não queimados devem indicar mistura pobre dos gases ou a falta de uma fonte adequada de ignição, ou no leito, ou no espaço livre acima deste.

Se se faz necessário manter a temperatura do leito, então uma certa porcentagem (dependente das perdas de calor do leito) do oxigênio disponível deve ser consumido no leito. Se pretendermos aumentar essa temperatura, então uma proporção maior do oxigênio deverá ser consumido dentro do leito.

Ao aumentarmos o consumo de O_2 dentro do leito, nós reduzimos sua concentração disponível para a queima de voláteis acima do leito. Nessas condições, o uso do ar secundário para reduzir a emissão de fumaça constitui apenas um paliativo, pois, se possível, todo o combustível deve queimar dentro do leito. A melhor

solução será aumentar o consumo de oxigênio dentro do próprio leito, fazendo com que a matéria volátil seja queimada aí.

Isso parece ser favorecido por:

- Altas temperaturas no leito
- Maiores velocidades de fluidização (boa mistura)
- Evitação de leitos rasos, que provocam a concentração e a proximidade da massa de combustível à superfície do leito.

c) Taxa de aquecimento das partículas

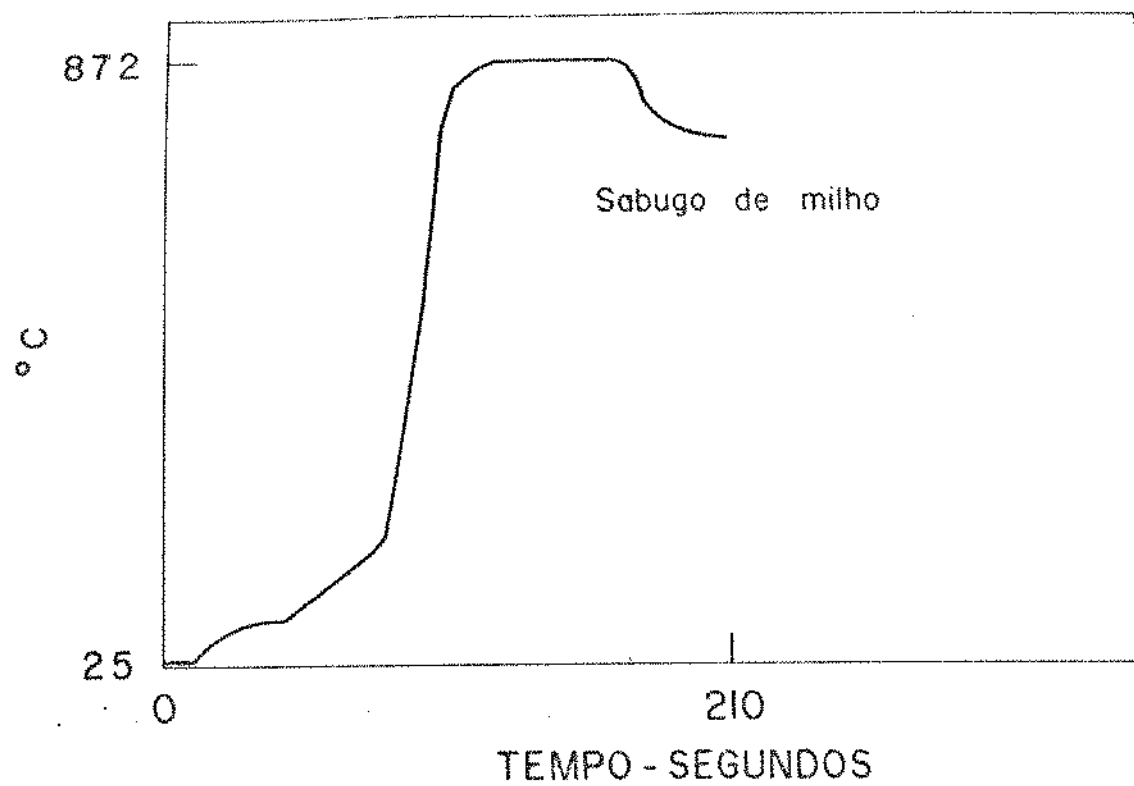
Foi observado durante a queima de carvão vegetal que as partículas maiores permaneciam escuras e com a temperatura abaixo daquela do leite, durante cerca de 1-2 minutos após a sua alimentação e portanto durante este tempo elas estavam tomando calor do leite. Essa observação foi possível devido a não ocorrência de chamas acima do leite.

A observação visual da taxa de aquecimento de cavacos de madeira ou de sabugos de milho, ambos com alto teor de voláteis, foi prejudicada pela ocorrência de tais chamas já citadas.

Utilizando-se do mini-leite, da maneira já descrita, as partículas eram mergulhadas em um leite com cerca de 760°C e o sinal do termopar em seu centro foi registrado até que a partícula fosse consumida ou, comumente, caísse do termopar.

Os resultados são mostrados nas figuras 16 e 17. Podemos ver que os sabugos de milho (Fig. 16) foram aquecidos mais rapidamente que pedaços com dimensões similares de carvão vegetal siderúrgico ou de madeira (Fig. 17). Isto ocorre por causa da menor inércia térmica dos sabugos ou porque a ignição da sua superfície, porosa, foi muito rápida (cerca de 1s) enquanto há uma demora de pelo menos 30s antes que ocorra uma combustão superficial significativa com madeira ou carvão vegetal.

Quando ao invés de pedaços especialmente selecionados de carvão vegetal ou de madeira (blocos cilíndricos), foram testados partículas de dimensões normais como cavacos e devido às suas

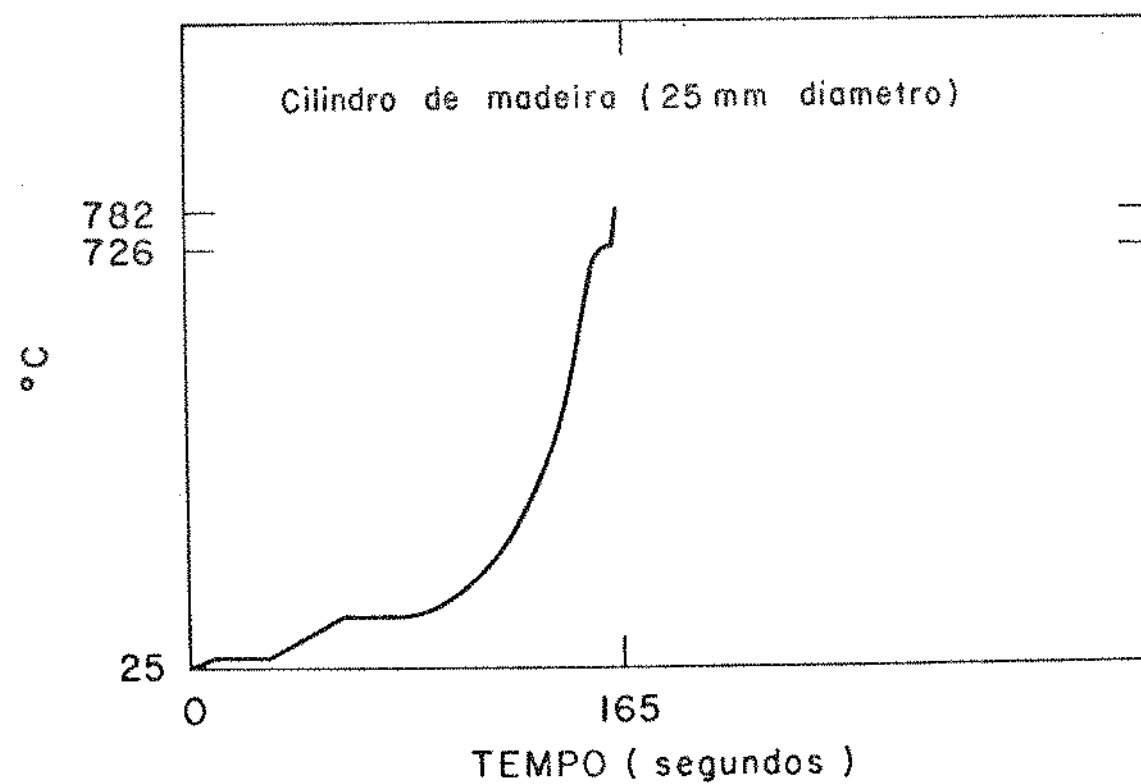
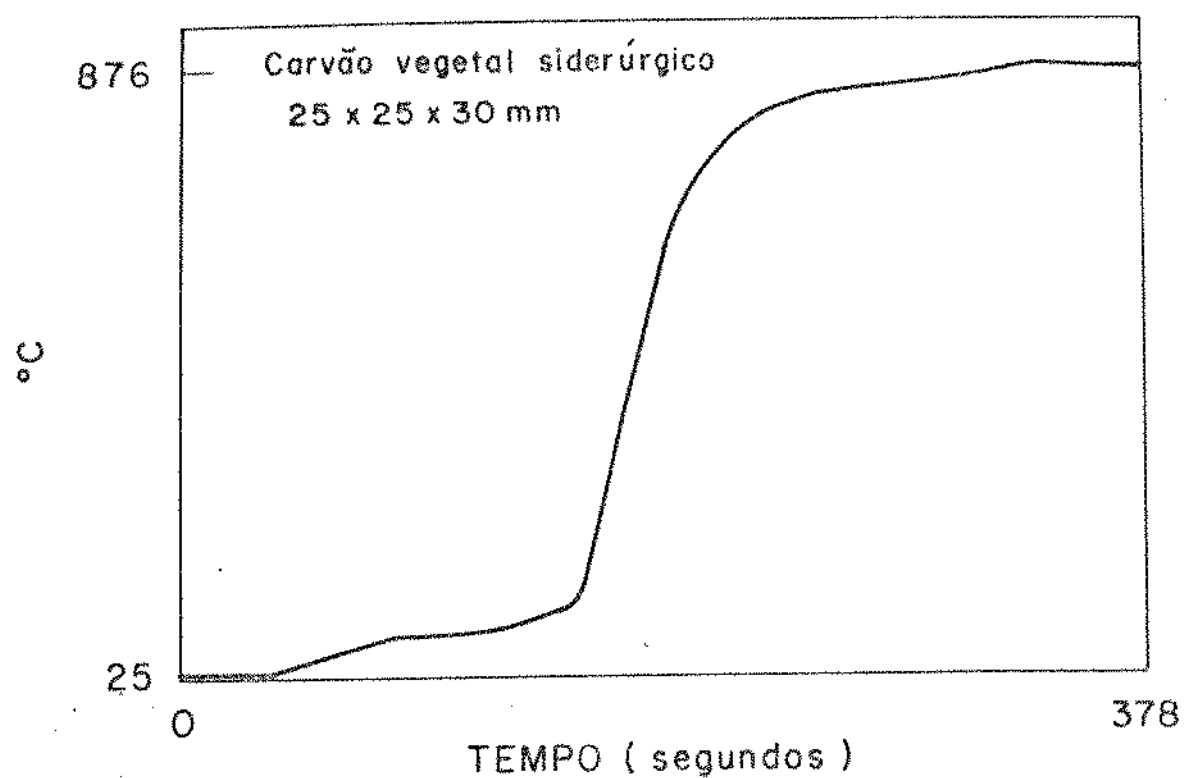


massas e inércia térmica serem muito menores que a de um sabugo seus centros alcançaram a temperatura do leito em um tempo mais curto (cerca de 18 s) (Fig. 16), comparados com os valores típicos de 100 s para sabugos e 200s para madeira ou carvão siderúrgico (figura 17).

Nos casos em que a partícula permaneceu ligada ao termopar, o registrador mostrou que a sua temperatura, imediatamente ou após uma pausa, ultrapassou o valor da temperatura do leito e depois de um período de tempo retornou a esse valor. Foi suposto que a diferença entre esse salto e a temperatura do leito dá uma indicação da temperatura de combustão; essa diferença foi da ordem de 1109C.

Foi observado ainda, com o mini-leito, que na presença de oxigênio disponível os voláteis de sabugo ou de madeira podem ser completamente queimados dentro do leito, bastando para isso que a partícula esteja totalmente imersa. Isso nos leva a concluir que a presença de chamas durante e após a alimentação de sabugos e de cavacos deve ser atribuída a segregação parcial das partículas no topo do leito ou ao surgimento ocasional destas na superfície.

Outro fator para a ocorrência de chamas durante o processo de alimentação desses combustíveis é a ocorrência de devolatilização devido ao aquecimento das partículas, nos gases de combustão, no trajeto do alimentador até o leito.



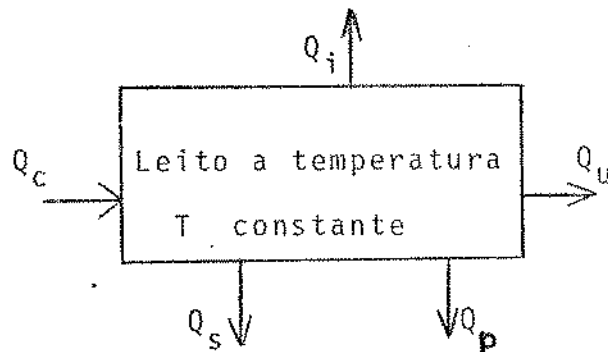
d). Testes do reator com sistema extrator de calor

A extração de calor do leite foi uma função da área de espiras disponível para troca de calor. A variação dessa área foi efetuada de duas maneiras:

a:- Variando-se a altura do leite cujo aumento permite encobrir sucessivamente os vários conjuntos de espiras (veja fig. 4).

b:- Elevando-se a parte do queimador, que contém as espiras, pela inserção abaixo desta de uma secção adicional (de 25 cm de altura) sem extração de calor. Este procedimento possibilitou aumentar o efeito de reservatório térmico do leite, ao aumentar a relação entre a sua altura e a área disponível de extração de calor.

Considerando-se o reator não isolado termicamente temos o seguinte balanço de energia:



Onde:

Q_c = calor liberado dentro do leito pela queima do combustível

Q_i = calor cedido pelo leito para aquecimento e ignição do combustível alimentado

Q_s = calor sensível, extraído com os gases da combustão

Q_p = calor perdido através do corpo do reator

Q_u = calor disponível para extração sem alteração da temperatura do leito

Para condições fixas de: temperatura do leito, taxa de alimentação de combustível, vazão de ar e supondo-se que todo o combustível é totalmente queimado dentro do leito, as quantidades Q_i , Q_s e Q_p são tomadas como constantes e o calor disponível para extração Q_u será uma função do poder calorífico do combustível considerado.

Os testes com extração de calor do leito foram realizados com carvão mineral, carvão vegetal ativado, resíduos de carvão siderúrgico e cavacos de madeira, sendo observadas diferenças marcantes entre a performance do reator para combustão dos três primeiros combustíveis e seu comportamento na queima dos cavacos de madeira.

Para os três tipos de carvões foi verificada boa estabilidade de combustão e fácil controle de operação, mostrando coerência com os resultados dos testes sem extração de calor, inclusive na obtenção de combustão estável com leitos rasos.

Para cavacos de madeira a estabilidade de combustão foi precária, exigindo um controle mais severo da taxa de alimentação e frequentemente a combustão ocorria com emissão de fumaça. As dificuldades encontradas na queima estável de cavacos foram provocadas por:

1 - Alta porcentagem de água (45%) na madeira queimada, a qual diminuiu o P.C. dos cavacos de 4300 para 2360 kcal/kg.

2 - Alto conteúdo de voláteis (86% em base seca) cuja combustão, ocorrendo parcialmente acima do leito, diminui o valor de Q_c .

3.- Falta de um alimentador adequado para alimentação contínua de cavacos, forçando o uso da alimentação manual por gravidade que promove o aquecimento das partículas de combustível acima e na superfície do leito, facilitando a devolatização fora do seu volume.

Verificou-se que a estabilidade da combustão de madeira é função da altura do leito: se esta é aumentada, melhora-se a eficiência da queima de voláteis no seu interior. Durante os testes de queima de cavacos, a tentativa de melhorar a estabilidade da combustão através do aumento da altura do leito foi parcialmente conseguida com a inserção da secção adicional, abaixo do conjunto de espiras. Tentativas de obtenção de alturas maiores foram impedidas porque também implicavam em dobrar ou triplicar a área de extração de calor dentro do leito e levariam a um resfriamento excessivo.

Atualmente está sendo projetada uma nova secção extratora de calor para o espaço livre acima do leito, a qual irá melhorar

o rendimento térmico do reator.

e). Dados típicos da operação dos reatores

- Perda de carga através da placa distribuidora: 20 cm de H_2O
- Perda de carga através do leito: entre 10 e 50 cm de H_2O
- Altura do leito: variável entre 10 e 50 cm
- Área da secção transversal do leito: 314 cm^2
- Área de troca térmica para extração de calor do leito: variou com o número de espiras imersas no leito, sendo a área de cada conjunto de espiras igual a 880 cm^2
- Perdas por elutriação: variaram muito com a velocidade da fluidização, tipo de combustível, granulometria e com a quantidade de finos.
- Perdas de calor através do corpo do reator (sem isolamento térmica): medida no reator sem o sistema extrator de calor = 70%
- Perdas de calor pelas paredes do reator, na região do leito: medida no reator sem o sistema extrator de calor = 50%
- Eficiência de combustão: variou muito com a velocidade de fluidização que alterou as perdas por elutriação. Para os carvões queimados seu valor ficou entre 80 e 95%. Para os cavacos e sabugos seu valor permaneceu incerto devido a falta de medida da quantidade dos voláteis não queimados.
- Eficiência térmica da extração direta de calor no leito: determinada com o sistema extrator de calor e definida

como a razão percentual entre o calor extraído diretamente do leite e o calor fornecido ao leite pelo combustível, sendo que essa determinação foi feita sem isolamento térmico do reator.

$$n = 45\%$$

- Temperatura de operação do leite: entre 700 e 950°C
Temperatura de entrada do ar no leite: 30 °C
- Temperatura de entrada de água: 20 °C
Temperatura de saída da água: 60 °C
- Vazão da água: entre 10 e 20 l/min (1200 l/h)
- Cálculos feitos com base na temperatura teórica de combustão indicam que a porcentagem de extração direta de calor do leite, operando a 800 °C, ficará entre 60% do total usando-se carvão vegetal como combustível e cerca de 40% quando queimando o bagaço de cana.

VI. Conclusões

Foram construídos e operados dois reatores de combustão fluidizada, sendo que um deles foi equipado com um sistema de extração direta de calor do leito, visando a sua transformação em uma pequena caldeira.

A quantidade de calor a ser extraído do leito é uma função do poder calorífico do combustível e seu valor máximo não deverá ultrapassar 60% do calor total liberado pelo combustível dentro do leito.

O fator limitante na extração de calor do leito foi a perda do calor disponível devido a:

- elutriação de combustível do reator, sem sofrer combustão.
- queima de combustível elutriado acima do leito.
- queima da matéria volátil acima do leito.

Os fatores que favorecem a queima da matéria volátil dentro do leito, são:

- altas temperaturas no leito.
- maiores velocidades de fluidização.
- maiores alturas do leito.

Foi desenvolvida a metodologia de testes, necessária a operação dos reatores de combustão fluidizada, bem como os métodos de coleta, análise e caracterização de amostras gasosas e de combustíveis.

Os resultados dos testes de combustão, mostram que a queima

de carvão mineral, carvão vegetal ativado, carvão vegetal siderúrgico, cavacos de madeira e sabugos de milho, não apresenta problemas incomuns; tendo sido verificado também que a queima de partículas grandes de combustíveis vegetais, como sabugos, ocorre com surpreendente facilidade, indicando esses combustíveis como de boa qualidade para a queima em queimadores de leito fluidizado.

A casca de arroz e o bagaço de cana, demonstraram a necessidade de se desenvolver um sistema de alimentação adequado a sua condição fibrosa, ou então a necessidade de serem compactados.

Foi verificado que a serragem de madeira necessita ser compactada para obtenção de sua queima com sucesso; devido principalmente ao fato de se apresentar em partículas de baixa densidade e pouca massa que favorecem a sua elutriação. Como o processo de compactação já possui uma tecnologia bem desenvolvida e não consome mais do que 2 ou 3% da energia do combustível; todos os três últimos combustíveis poderão se constituir em excelente material para combustão fluidizada.

Os problemas observados na alimentação e elutriação dos combustíveis vegetais, em particular bagaço e serragem, foram causados em grande parte pela pequena escala dos reatores utilizados. Em uma escala maior esses problemas serão minizados ou completamente sanados.

A grande porosidade em uma partícula de combustível parece permitir uma ignição mais rápida e um melhor controle da temperatura do leito, como nos mostrou o exemplo do sabugo de milho.

Os resultados dos testes de combustão, criam dúvidas, na aplicabilidade da teoria das duas fases para a combustão de partículas grandes em um leito fluidizado de inertes finos.

BIBLIOGRAFIA

- 1- Skinner D.G. " The fluidised combustion of coal ".National Coal Board - January 1970.
- 2- Hoy H.R. and Roberts A.G. "Fluidised combustion of coal at high pressures ".Aiche Symposium Série,68 (126).
- 3- Andrade J.F.M.,Ventura R.O. e Saddy M. "Combustão fluidizada como tecnologia energética para matérias primas brasileiras" 39 Congresso Brasileiro de Engenharia Química - 1978.
- 4- Botterill J.S.M. " Fluid Bed Heat Transfer " - Academic Press 1975.
- 5- Lewis J.B. and Partridge B.A. Nature, Lond.,216,Oct.14,1967, pp.124-127.
- 6- Dryden " The Efficient Use of Energy " 1975.
- 7- F. Engstrom, " Pyroflow - A circulating fluid bed reactor for energy production from low grade fuels" ,Anais do Seminário Brasileiro de Combustão Fluidizada, 1979.
- 8- Field M.A.,Gill D.W.,Morgan B.B. and Hawksley P.G.W. " Combustion of Pulverised Coal", 1967 (Leatherhead: The British Coal Utilization Research Association).
- 9- Avedesian M.M. and Davidson J.F., " Combustion of Carbon Particles in a Fluidized Bed ", Trans. Instn. Chem. Engrs.,vol. 51,1973.
- 10-Beēr J.M. " Aplicação de Fundamentals Research to the Design and Industrial Development of Fluidized Bed Combustors ", Brazilian Seminar on Fluidized Bed Combustion,December,1979.

- 11- Chakraborty R.K. and Howard J.R., " An Experimental Study of the Mechanism of the Combustion of Carbon in Shallow Fluidised Beds ".

Figura 8

Gráficos de Temperatura vs Tempo e de Volume de gás vs Tempo

Combustível: carvão mineral

Altura do leito = 30 cm

Vazão de ar = 13,6 g/s

Velocidade de fluidização (850 C) = 1,38 m/s

Ar em excesso = 30 %

T_1 = temperatura dentro do leito, 7 cm acima do distribuidor

T_2 = temperatura dentro do leito, 22 cm acima do distribuidor

T_3 = temperatura acima do leito, 37 cm acima do distribuidor

T_4 = temperatura acima do leito, 53 cm acima do distribuidor

Δ = % CO_2

$\diamond$ = % O_2

$\bullet$ = % CO