

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE TÉRMICA E FLUIDOS

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR FRANCISCO
JOSÉ DOS SANTOS APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 12.4.91

Tese de Doutorado

R.B. Peel
ORIENTADOR

Título : Mecanismos da Queima de Combustíveis Ve
getais em Leito Fluidizado Borbulhante

Autor: Francisco José dos Santos

Orientador: Raymond Burnyeat Peel

Co-orientador: Leonardo Goldstein Jr.

Aprovado por

SANTOS

Leonardo Goldstein Jr

Prof. Dr. LEONARDO GOLDSTEIN JR.

Presidente

R.B. Peel

Prof. Dr. RAYMOND BURNYEAT PEEL

Carlos A Luengo

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO LUENGO

[Signature]

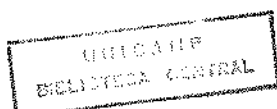
Prof. Dr. GERALDO LOMBARDI

K.A.R. Ismail

Prof. Dr. KAMAL A. R. ISMAIL

Campinas, 12 de abril de 1991.

Bol 940 46-13



Ao meu pai Pedro, pelo exemplo de vida,
À minha mãe Aparecida, pela vida que me deu,
À minha esposa Márcia, que me deu amor,
Às minhas filhas Jeanne, Marcela e Melina,
Porque com elas veio a compreensão da criança que já fui, e
Da felicidade que existe em se viver um dia de cada vez.

RESUMO

Neste trabalho são estudados os mecanismos da queima de combustíveis vegetais em leito fluidizado borbulhante. Apresenta-se inicialmente um apanhado do desenvolvimento tecnológico da área e o "estado da arte" da pesquisa básica. Desenvolve-se a seguir o estudo experimental da distribuição de massa do combustível vegetal dentro do leito, utilizando-se para tanto um leito bidimensional transparente, sendo o combustível vegetal simulado por blocos cilíndricos de madeira, com diferentes densidades e tamanhos.

Segue-se o estudo dos fatores que determinam a taxa de queima do carbono fixo dos combustíveis vegetais. Analiza-se o efeito das condições de operação do leito fluidizado borbulhante, como temperatura do leito, velocidade superficial do gás, concentração de oxigênio e granulometria dos inertes. Discute-se também o efeito das características físico-químicas dos diferentes combustíveis sobre a taxa de queima.

Entre os fatores que podem modificar os valores da taxa de queima está o atrito com os inertes do leito; para fornecer subsídios ao estudo deste problema, são apresentados resultados de testes da perda de massa dos combustíveis devido ao atrito com os inertes. Relativamente à influência do leito fluidizado, propriamente dito, no processo da queima, mediu-se e comparou-se as taxas de queima obtidas com e sem a presença do leito.

Na sequência são apresentados os resultados do estudo sobre os fatores que influenciam a devolatilização e a queima dos voláteis dentro do leito fluidizado borbulhante.

Finalmente, avalia-se o conjunto das informações levantadas e discute-se sua importância em relação ao objetivo de queimar combustíveis vegetais com eficiência em um queimador de leito fluidizado borbulhante.

Abstract

This thesis consists of a study of the combustion of vegetable fuels in a bubbling fluidised bed.

Initially an overview of the technological development and the present situation of basic research in the area are presented.

It follows an experimental study of the distribution of simulated fuel particles within the fluidised bed, using various sizes and densities of wood cylinders within transparent and bi-dimensional fluidised bed.

The next section is a study of the factors which control the rate of combustion of charcoal from vegetable fuels; operating conditions such as bed temperature, fluidising velocity, oxygen concentration of the fluidising gas and density and size grading of the inert bed material were considered, together with the physical and chemical properties of the fuels.

Erosion of the fuel or charcoal by the inert particles in the bed could possibly effect the apparent rate of combustion. Tests on the rate loss of mass from fuel and charcoal particles by erosion were performed and the rate of burning results were compared with and without the fluidised bed, at equal superficial gas velocities.

The results of a study of the factors which influence devolatilization and burning of the volatiles within a bubbling fluidised bed are given next.

Finally the results obtained are considered as a whole and their relations to the objective of efficient combustion of vegetable fuels in a bubbling fluidised bed is analysed.

Agradecimentos.

Aos Professores Raymond B. Peel e Leonardo Goldstein Jr., pela orientação deste trabalho.

Ao Professor Carlos A. Luengo, pelas facilidades para utilização do Laboratório de Combustíveis Alternativos do IFGW/DFA.

Ao Professor Caio G. Sanches, pela ajuda na montagem do equipamento no Laboratório do Departamento de Térmica e Fluidos - FEM.

Ao Professor Francisco G. Emmerich, da Universidade Federal do Espírito Santo, pela ajuda na utilização do sistema de carbonização à vácuo.

À FINEP pelo financiamento da pesquisa através de contrato FINEP/FUNCAMP nº 4.4.85.0330.00.

Ao CNPq pela concessão de bolsa de doutoramento.

À FAPESP pela concessão de auxílio à pesquisa.

Ao Departamento de Física do I.G.C.E./UNESP - Rio Claro pela concessão do afastamento com bolsa do PICO/CAPE.

A todos os colegas, amigos e funcionários do Departamento de Física - UNESP, Do Laboratório de Combustíveis Alternativos do IFGW/UNICAMP e do Departamento de Térmica e Fluidos da FEM/UNICAMP, pela convivência e pelo incentivo.

INDICE

Resumo.....	1
Abstract.....	11
Agradecimentos.....	iii
Indice	iv
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas.....	xiii
Nomenclatura	xv

1. Introdução

1.1 Objetivos.....	7
--------------------	---

2 Fundamentos sobre fluidização e combustão em leito fluidizado borbulhante

2.1 Fluidodinâmica do leito fluidizado	9
2.2 Transferência de calor em leito fluidizado	14
2.3 Mecanismo de controle da reação de combustão	18
2.4 Mecanismo de controle da combustão em leito fluidizado	22
2.4.1 Queima da matéria volátil do carvão mineral em leito fluidizado borbulhante.....	25
2.4.2 Expressões para a taxa de queima	28
2.4.3 Transferência de massa em um leito fluidizado borbulhante	31
a. Transferência de massa da fase gasosa para a superfície da partícula de combustível.....	31
b. Perfil da concentração dos gases em torno da partícula de combustível.....	35

c. Troca de oxigênio entre as fases de bolha e de emulsão.....	40
2.4.4 Atrito e fragmentação.....	41
2.5 Modelagem da queima em combustores de leito fluidizado borbulhante.....	44
2.6 Queima de Combustíveis Vegetais em Leito fluidizado Borbulhante.....	49
2.6.1 Caracterização dos combustíveis vegetais.....	49
2.6.2 Influência das propriedades dos combustíveis vegetais nas condições de operação de um queimador de leito fluidizado borbulhante.....	52
a. Tamanho das partículas.....	52
b. Densidade.....	53
c. Matéria volátil.....	54
3 Estudo da Distribuição de Massa Dentro de um Leito Fluidizado Borbulhante.....	
3.1 Dispositivo experimental e operação.....	58
3.2 Apresentação dos resultados.....	61
3.3 Conclusões.....	83
4 Estudo dos Fatores que Influenciam a Taxa de Queima de Carvões Vegetais em um Queimador do Leito Fluidizado Borbulhante.....	
4.1 Dispositivo experimental.....	85
4.2 Preparação de amostras para os testes de queima.....	87
4.3 Metodologia dos testes.....	90
4.3.1 Medida da diferença de temperatura (DT) entre a amostra de combustível e os inertes do leito fluidizado.....	90
4.3.2 Medida da taxa de aquecimento da amostra de combustível.....	

vel e do tempo de ignição.....	91
4.3.3 Medida do tempo para a combustão completa.....	93
4.3.4 Medida da taxa específica de queima.....	93
4.4 Apresentação dos resultados experimentais.....	95
4.4.1 Diferença de temperatura (DT) entre a amostra de combustível e o leito em um queimador de leito fluidizado borbulhante.....	95
4.4.2 Taxa de aquecimento e tempo de ignição.....	101
4.4.3 Taxa específica de queima.....	106
4.5 Propriedades físicas dos combustíveis e sua influência sobre a combustão em leito fluidizado.....	139
4.6 Conclusões.....	140
5 Estudo do Efeito de Atrito Sobre a Perda de Massa da Amostra de Combustível na Combustão em Leito Fluidizado Borbulhante	
5.1 Dispositivo experimental e operação.....	143
5.1.1 Medida da perda de massa das amostras de combustível provocada pelo atrito com o leito frio.....	143
5.1.2 Medida da taxa específica de queima em leito fluidizado e em uma corrente de gás quente.....	144
5.2 Apresentação dos resultados experimentais.....	145
5.2.1 Perda de massa das amostras de combustível devido ao atrito no leito fluidizado a frio.....	145
5.2.2 Taxa específica de queima no leito fluidizado e na corrente de gás.....	146
5.3 Discussão dos resultados.....	150
5.4 Conclusões.....	151

6 Estudo da Devolatilização de Biomassa e das Condições que Favorecem a Queima dos Voláteis Dentro de um Leito Fluidizado Borbulhante	
6.1 Dispositivo experimental e operação.....	155
6.1.1 Estudo do tempo de devolatilização de biomassa. .	155
6.1.2 Estudo das condições que favorecem a queima dos voláteis da biomassa dentro de um leito fluidizado borbulhante.....	157
6.2 Apresentação dos resultados experimentais	159
6.2.1 Medida do tempo de devolatilização.	159
6.2.2 Fatores que favorecem a queima dos voláteis de biomassa dentro do leito fluidizado	166
6.3 Conclusões.....	168
7 Conclusões e Sugestões.....	169
Referências.....	178

Lista de Figuras

1.1	Relação percentual entre a quantidade de SO_2 de origem externa e a quantidade total anual na Europa.....	2
1.2	Projeto inicial de Winkler para a gaseificação em leito fluidizado.....	4
2.1	Esquema dos regimes de fluidização.....	11
2.2	Diagrama de Geldart para a classificação do material particulado do leito.....	12
2.3	Padrão de escoamento do gás de fluidização associado à fase de bolhas; a) bolha com $U_b \cdot E_{mf} > U_{mf}$, b) bolha com $U_b \cdot E_{mf} < U_{mf}$	13
2.4	Relação empírica entre o coeficiente condutivo de transferência de calor e a granulometria do leito.....	15
2.5	Gráfico da variação do coeficiente de transferência de calor do leito para uma superfície imersa, em função da velocidade de fluidização para materiais de tipos A, B e D15	
2.6	Efeito da temperatura e do tamanho de partícula, sobre o coeficiente máximo de transferência de calor do leito para uma superfície imersa.....	16
2.7	Transferência de calor por radiação h_r , em relação à transferência de calor total.....	17
2.8	Características dos regimes cinético e difusional de queima de uma partícula de combustível.....	19
2.9	Taxa específica de queima em função da temperatura, para os regimes cinético e difusional.....	20

2.10	Diagrama de Arrhenius, mostrando os regimes de controle das reações de um combustível sólido poroso...	21
2.11	Esquema de uma caldeira com combustão em leito fluidizado borbulhante...	23
2.12	Esquema de uma partícula de carvão queimando em um leito fluidizado...	29
2.13	Perfis de concentração para CO, CO ₂ e O ₂ , em torno de uma partícula esférica de carbono...	37
2.14	Dados de Khitrin e Golovina (1964) para as taxas de reação de uma esfera de carbono com ar, CO ₂ e vapor de água...	38
3.1	Leito bidimensional...	59
3.2	Ocorrência de amostras fora da emulsão em função do número de amostras de combustível no leito - amostras de 2,0x2,3 cm...	69
3.3	Ocorrência de amostras fora da emulsão em função do número de amostras de combustível no leito - amostras de 4,0x2,3 cm...	70
3.4	Ocorrência de amostras fora da emulsão em função do número de amostras de combustível no leito - amostras de 7,5x2,3 cm...	71
3.5	Ocorrência de amostras fora da emulsão em função do número de amostras de combustível no leito - amostras de 2,0x3,2 cm...	72
3.6	Ocorrência de amostras fora da emulsão em função do número de amostras de combustível no leito - amostras de 4,0x3,2 cm...	73

3.7	Ocorrência de amostras fora da emulsão em função do número de amostras de combustível no leito - amostras de 7,5x3,2 cm.....	74
3.8	Ocorrência de amostras na região de bolhas em função do número de amostras de combustível no leito - amostras de 2,0x2,3cm.....	79
3.9	Ocorrência de amostras na região de "splash" em função do número de amostras de combustível no leito - amostras de 2,0x2,3cm.....	80
3.10	Ocorrência de amostras fora da emulsão em função da densidade das amostras - amostras de 2,0x2,3 cm.....	81
4.1	Mini-leito de combustão fluidizada.....	86
4.2	Gráfico de DT em função da temperatura de leito para carvão vegetal de eucalipto.....	97
4.3	Gráfico de DT em função da temperatura de leito para grafite.....	97
4.4	Gráfico da taxa específica de queima em função da temperatura do leito para carvão vegetal de eucalipto.....	98
4.5	Gráfico da taxa específica de queima em função da temperatura do leito para grafite.....	99
4.6	Temperatura da amostra de combustível em função do tempo de residência no leito.....	101
4.7	Mecanismo de aquecimento do centro da amostra de combustível.....	102
4.8	Taxa de aquecimento das amostras de grafite.....	103
4.9	Taxa de aquecimento das amostras de carvão vegetal de eucalipto.....	104

4.10	Gráfico da taxa específica de queima em função da temperatura no leito.....	108
4.11	Gráfico da taxa específica de queima em função da temperatura no leito.....	109
4.12	Gráfico da taxa específica de queima em função da temperatura no leito.....	110
4.13	Gráfico da taxa específica de queima em função da temperatura no leito.....	111
4.14	Gráfico da taxa específica de queima em função da temperatura no leito.....	112
4.15	Efeito da granulometria do material do leito sobre a taxa específica de queima, M, para grafite.....	114
4.16	Efeito da granulometria do material do leito sobre a taxa específica de queima, a) C.V.Sabugo, b) C.V.Casca, c) C.V.Babaçu.....	115
4.17	Efeito da velocidade de fluidização sobre a taxa específica de queima para grafite.....	116
4.18	Efeito da velocidade de fluidização sobre a taxa específica de queima a) C.V.Casca, b) C.V.Sabugo.....	117
4.19	Efeito da velocidade de fluidização sobre a taxa específica de queima para C.V.Babaçu.....	118
4.20	Efeito da concentração de oxigênio sobre a taxa de queima para grafite.....	119
4.21	Gráfico da taxa específica de queima em função da temperatura no leito - $U = 1$ m/s.....	122
4.22	Gráfico da taxa específica de queima em função da temperatura no leito - $U = 2$ m/s.....	123

4.23 Gráfico da taxa específica de queima em função da temperatura no leito - $U = 3 \text{ m/s}$	124
4.24 Gráfico da taxa específica de queima em função da temperatura no leito - $d_p = 0,54 \text{ mm}$	125
4.25 Gráfico da taxa específica de queima em função da temperatura no leito - $d_p = 0,25 \text{ mm}$	125
4.26 Coeficientes de difusão em função da temperatura.....	128
4.27 Gráfico da taxa específica de queima, M_2 , em função da temperatura do leito.....	129
4.28 Gráfico da taxa específica de queima, M_3 , em função da temperatura do leito.....	131
4.29 Perda de massa em função da área superficial externa $T_1 = 750^\circ\text{C}$ e $t_r = 3 \text{ min}$	134
4.30 Tempo para a combustão completa em função da massa da amostra - $T_1 = 750^\circ\text{C}$ e $O_2 = 10\%$	135
5.1 Taxa específica de queima, M , em função da área específica. Comparação entre os valores obtidos na corrente de gás e no leito fluidizado.....	147
5.2 Taxa específica de queima, M , em função da área específica. Comparação entre os valores obtidos na corrente de gás e no leito fluidizado.....	148
5.3 Taxa específica de queima, M , em função da área específica. Comparação entre os valores obtidos na corrente de gás e no leito fluidizado.....	149
5.4 Taxa específica de queima, M , em função da área específica. Comparação entre os valores obtidos na corrente de gás e no leito fluidizado.....	150
6.1 Reator de combustão em leito fluidizado.....	158

Lista de Tabelas

2.1	Expressões empíricas para o número de Sherwood (Sh).....	33
2.2	Análise elementar de biomassas e de carvões	50
2.3	Análise imediata de biomassas e de carvões.....	51
2.4	Comparação em massa e volume para a geração de energia de diferentes combustíveis.....	51
3.1	Ocorrência de amostras fora da emulsão (Filme Super 8).....	62
3.2	Ocorrência de amostras fora da emulsão.....	64
3.3	Ocorrência de amostras fora da emulsão.....	65
3.4	Ocorrência de amostras fora da emulsão.....	66
3.5	Ocorrência de amostras fora da emulsão.....	67
3.6	Média de ocorrência de amostras fora da emulsão	75
3.7	Média de ocorrência de amostras fora da emulsão.....	75
3.8	Média de ocorrência de amostras fora da emulsão.....	76
3.9	Média de ocorrência de amostras fora da emulsão.....	76
3.10	Ocorrência de amostras fora da emulsão	77
3.11	Ocorrência de amostras fora da emulsão.....	78
4.1	Propriedades de carvões vegetais e de grafite.....	107
4.2	Condições de operação do leito.....	132
4.3	Taxa de queima em função da porosidade.....	132
4.4	Valores da conversão percentual para a razão área geomé- trica /massa.....	133
4.5	Taxa de queima em função da área específica e do teor de cinzas do combustível.....	140
5.1	Perda de massa das amostras devido ao atrito com o leito (g/cm^2s).....	146

5.2	Comparação entre a perda de massa por atrito e a perda de massa devido à queima.....	151
6.1	Tempo de devolatilização da Peroba Rosa em leito fluidizado - (em segundos).....	160
6.2	Tempo de devolatilização da Peroba Rosa sem leito - (em segundos).....	160
6.3	Tempo de devolatilização do Eucalyptus Alba em leito fluidizado - (em segundos).....	160
6.4	Tempo de devolatilização do Eucalyptus Alba sem leito - (em segundos).....	161
6.5	Tempo de devolatilização do Bagaco de cana em leito fluidizado - (em segundos).....	161
6.6	Tempo de devolatilização do Bagaco de cana sem leito - (em segundos).....	161
6.7	Tempo de devolatilização em função da densidade para a dimensão de 10 mm - (em segundos).....	162
6.8	Razão entre o tempo de devolatilização, sem e com a presença do leito fluidizado (t_f/t_{f1})	163

Nomenclatura

- A : área da secção transversal do leito
 A_g : área específica do combustível
 A_g : área geométrica superficial inicial do combustível
 C_p : concentração de oxigênio no gás de fluidização
 C_s : concentração de oxigênio na superfície do combustível
 $C_O(r)$: concentração de oxigênio, no escoamento de gás em função da distância da superfície do combustível
 d : diâmetro da amostra de combustível
 d_p : diâmetro das partículas do leito
 DM : perda de massa da amostra de combustível
 DT : diferença de temperatura entre a amostra de combustível e o leito
 E : porosidade do leito
 E_a : energia de ativação
 E_b : fração de volume de bolhas em relação ao volume do leito
 E_{mf} : porosidade do leito na condição de fluidização incipiente
 g : aceleração da gravidade
 h : coeficiente de transferência de calor entre o leito e uma superfície imersa
 h_g : componente convectivo de h
 h_r : componente de h , devido à radiação no leito
 $h_{máx}$: h calculado pela equação de Zabrodsky
 h_p : componente condutivo de h
 K_c : coeficiente cinético para a transferência de massa

- K_g : condutividade térmica do gás
- K_0 : limite de K_c , quando $1/T_p$ tende à zero
- K_m : coeficiente de transferência de massa por difusão de oxigênio para a superfície do combustível
- m : massa dos inertes do leito
- M : taxa específica de queima
- M_1 : taxa específica de queima com correção para a perda de massa devida às cinzas do combustível
- M_2 : taxa específica de queima, considerando-se a área específica do combustível como a área disponível para a reação de queima
- M_3 : taxa específica de queima, considerando-se a porosidade como um parâmetro indicativo da profundidade de penetração do oxigênio no combustível
- n : ordem de reação
- P : porosidade do combustível
- R : constante universal dos gases
- Re : número de Reynolds
- Sc : número de Schmidt
- Sh : número de Sherwood
- t : tempo para a queima completa do combustível
- t_f : tempo para a devolatilização completa no forno tubular
- t_{f1} : tempo para devolatilização completa no leito fluidizado
- t_r : tempo de residência da amostra de combustível no leito
- T_1 : temperatura do leito
- T_p : temperatura da amostra de combustível

- $T(r)$: temperatura do gás em função da distância em relação à superfície do combustível
- U : velocidade de fluidização
- U_b : velocidade de subida da bolha
- U_{mb} : velocidade mínima do gás para o surgimento de bolhas
- U_{mf} : velocidade mínima de fluidização
- W_m : limite difusional para a taxa de queima
- δ : espessura da camada limite
- ΔP_b : perda de carga no leito
- ρ : densidade dos blocos cilíndricos de madeira, usados nos testes de distribuição de massa no leito
- ρ_p : densidade do material do leito
- ρ_f : densidade do fluido
- ϕ : diâmetro dos blocos cilíndrico de madeira usados nos testes de distribuição de massa no leito

CAPÍTULO 1. Introdução

Dos processos de geração da energia necessária para a sociedade, a queima dos combustíveis mais diversos, foi responsável em 1975 por cerca de 96% de toda a energia consumida no mundo; e projeta-se que para o ano 2000 ainda deverá exceder a 80%. Portanto, o consumo de energia com origem no processo de queima é tal que, melhorar sua eficiência em cerca de 5 a 20% ao longo do final do século será equivalente a economizar energia no nível das contribuições somadas da energia nuclear, hidroelétrica e todas as demais fontes restantes. Não importa quão longe se vise o futuro, parece certo que não há como substituir totalmente a energia proveniente do processo de combustão.

Contudo, mesmo que se pudesse contar com reservas ilimitadas de combustíveis a queima ainda seria objeto de pesquisa, devido à necessidade de se evitar a combustão como fonte geradora de poluição. Desde muito o uso da energia dos combustíveis têm liberado fuligem e outros produtos da queima incompleta, além de óxidos de nitrogênio e enxofre na atmosfera.

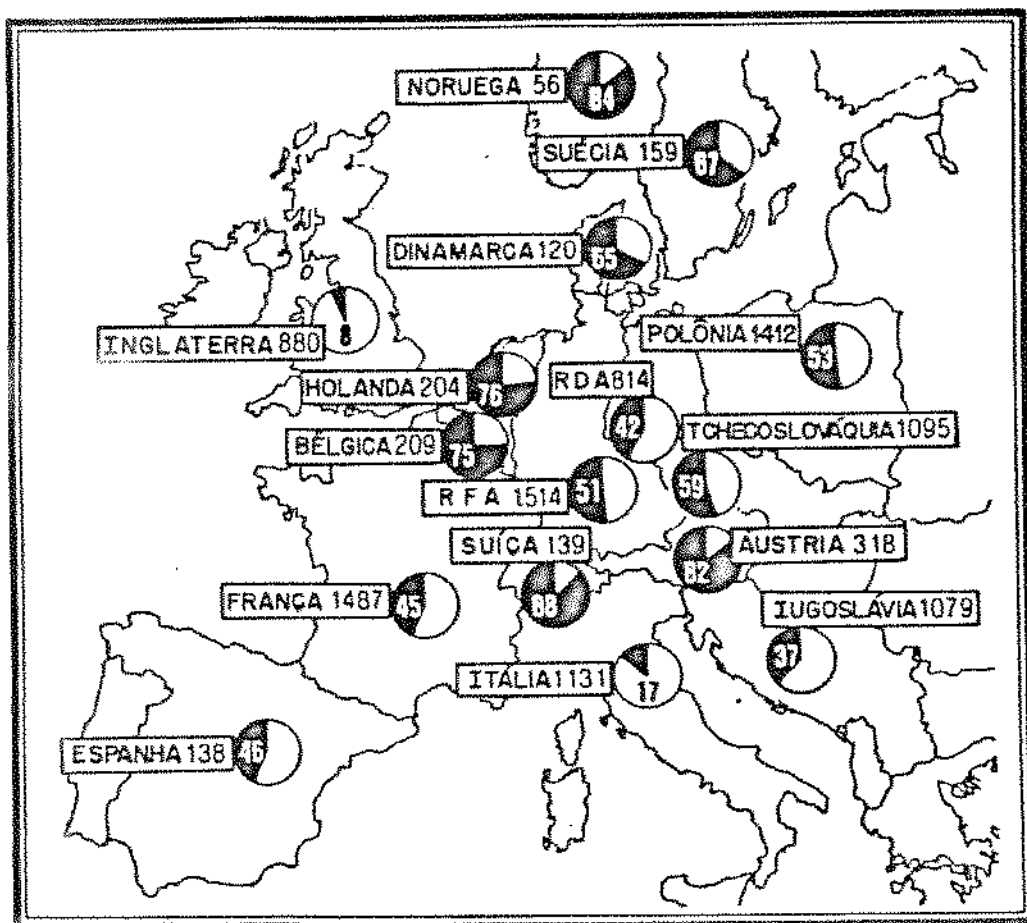
Antes do advento da rápida industrialização isto produzia somente problemas de poluição localizados ou transitórios; com o consumo de combustível dobrando a cada 20 anos a poluição foi adquirindo proporções globais. A magnitude do problema pode ser ilustrada através da Figura 1.1, onde são apresentadas as quantidades de SO_2 liberadas na atmosfera durante o ano de 1978 na Europa. Para cada país a porcentagem da poluição importada de seus vizinhos aparece em termos de porcentagem do total.

Não obstante a importância da energia proveniente dos combustíveis para a humanidade, até recentemente a utilização dos

processos de queima não revelava uma preocupação maior com sua eficiência e qualidade. Havia uma razão para isto:

-Os combustíveis sempre foram muito baratos. Foi somente há pouco tempo que os preços dos combustíveis começaram a subir rapidamente.

-Só recentemente as questões relativas ao meio ambiente vieram a ser consideradas mais relevantes. Há poucas décadas atrás as cidades industrializadas se orgulhavam de sua atmosfera esfumada com o sentimento de que "onde há poluição há prosperidade".



Quantidade de SO₂ (10³ t) - (1978)

Figura 1.1: Relação percentual entre a quantidade de SO₂ de origem externa e a quantidade total anual na Europa (Radovanovic, 1986)

O rápido crescimento dos países desenvolvidos levou a sociedade a reavaliar seus próprios valores e conceitos acerca da qualidade de vida. O homem se tornou mais preocupado acerca da descarga de produtos poluentes na atmosfera que ele respira, e também passou a considerar que num futuro não muito distante teria que usar combustíveis de menor qualidade e mais difíceis de queimar.

A partir deste contexto foi estimulada a pesquisa visando o desenvolvimento de tecnologias de queima que possuíam um potencial para a geração de energia com maior eficiência e menor poluição.

Dentre essas tecnologias a combustão em leito fluidizado apresenta algumas vantagens sobre os métodos convencionais de queima; a saber:

- i. A temperatura da fornalha pode ser mantida uniforme e baixa ($\sim 800^{\circ}\text{C}$), o que significa menor formação de NO_x e se evitar a fusão de cinzas;
- ii. O dióxido de enxofre pode ser capturado a seco no leito pela adição de calcário;
- iii. O leito fluidizado possui coeficientes de troca de calor muito altos. Isto significa que a área dos trocadores de calor e, conseqüentemente, as caldeiras podem ser menores do que na combustão pulverizada.
- iv. O combustor de leito fluidizado possui a capacidade de queimar combustíveis de baixa qualidade, com alto teor de cinzas e umidade. A característica desse queimador, de aceitar ampla faixa de combustíveis diferentes, o habilita a ser usado como excelente incinerador;

- v. A caldeira com combustão em leito fluidizado pode operar com altas taxas de geração de potência, até 3 MW/m^2 de área de secção do leito;
- vi. O combustor com leito fluidizado necessita de menores custos de preparação do combustível relativamente à queima do combustível pulverizado; e
- vii. A eficiência de queima é comparável a da combustão pulverizada.

Embora, conforme mencionado por Weinberg (1986), o fenómeno de fluidização tenha sido observado em fornalhas de grelha para a queima de carvão mineral, antes mesmo da primeira observação de Fritz Winkler, na Alemanha em 1921, este foi o primeiro a reconhecer que este fenómeno poderia ser utilizado de maneira prática. Em 1922 ele registrou a patente para o uso do leito fluidizado em dois processos: i-para produção de carvão ativado pela ação do vapor sobre o coque, e ii-para a gaseificação de finos de carvão com ar e vapor (Figura 1.2).

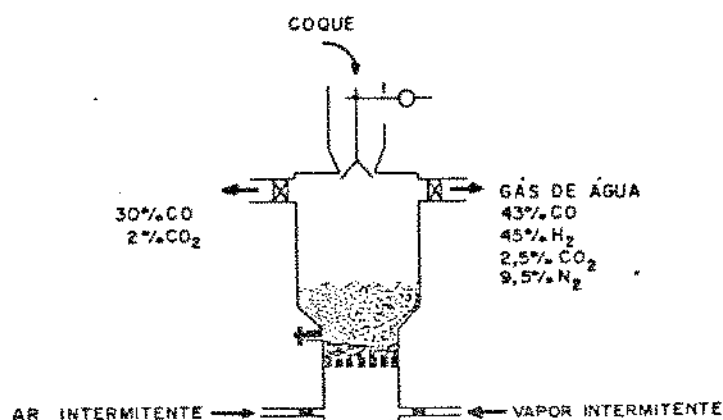


Figura 1.2: Projeto inicial de Winkler para a gaseificação em leito fluidizado

Logo após Winkler, Odell nos Estados Unidos registrou a patente do uso do leito fluidizado no craqueamento catalítico. Essa mesma patente cedida para a Standard Oil Company, foi apresentada em 1950 para o uso em fornalhas e caldeiras. A aplicação para fornalhas foi desenvolvida por Borr-Oliver. Ainda em 1950 foi desenvolvido na França pela "Société Anonyme Activit" o sistema "Ignifluido". Esses sistemas não faziam a extração direta de calor do leito. Processos basicamente semelhantes a esse foram usados na Romênia, 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 (Bandische Anilin e Lurgi) entre 1952 e 1959.

No final dos anos 50, começo da década de 60, Elliot na Central Electricity Generating Board (C.E.G.B.) Inglaterra, pesquisava o uso da queima em leito fluidizado para a geração de eletricidade.

Logo após, Thurlow e Wright, nos laboratórios da British Coal Utilization Research Association (B.C.U.R.A) iniciaram o trabalho no protótipo inicial de uma caldeira de leito fluidizado.

A idéia foi adotada nos EUA em 1965 por Bishop e Pope, da Pope, Evan e Robins Engenharia e foi rapidamente desenvolvido em uma caldeira experimental. Este protótipo levou à construção de uma caldeira, que foi operada com alta velocidade de gás e alto nível de arrasto de finos (Nack, Kiang, Liu, Murthy, Smithson e Oxley, 1976).

Através dos esforços de Hoy, o BCURA foi pioneiro na construção do combustor de leito fluidizado pressurizado, concluído e posto em operação em 1969. Neste mesmo ano o BCURA projetou uma caldeira industrial aquotubular, (Hoy e Kaye-1979).

O estímulo para a intensificação da pesquisa e desenvolvimento da combustão em leito fluidizado nas décadas de 70 e 80, veio do aumento do preço do óleo com relação ao preço do carvão. A partir da crise do petróleo em 1973, houve a necessidade de se estudar novos e mais eficientes meios para a queima do carvão e outros combustíveis sólidos. Embora tenha sido realizada em vários países, a pesquisa e desenvolvimento do uso de leito fluidizado para caldeiras e fornalhas, ocorreu principalmente nos EUA e na Inglaterra.

Na Inglaterra os incentivos foram a necessidade de utilização de combustíveis sólidos no aquecimento domiciliar, bem como no mercado de caldeiras industriais em geral. Nos Estados Unidos a combustão em leito fluidizado foi considerada principalmente como meio de controlar a poluição atmosférica causada pela emissão de óxidos de enxofre e nitrogênio.

Pesquisadores de outros países como a Austrália, a China, a Índia tinham seu interesse de pesquisa ligado ao potencial para a queima de combustíveis de baixa qualidade.

Detalhes sobre o desenvolvimento da tecnologia da combustão em leito fluidizado, podem ser encontrados em Skinner (1970); Neck, Kiang, Liu, Murthy, Smithson e Oxley (1976); Anson (1978); Highley e Kaye (1983) e Valk (1986).

1.1- Objetivos.

No Brasil, o clima tropical e a grande extensão territorial facilitam o cultivo de espécies vegetais para fins energéticos, bem como proporcionam a disponibilidade de uma grande quantidade de resíduos vegetais.

Há, portanto, oportunidade para a substituição, na área industrial, de óleo combustível por combustíveis vegetais. A queima em leito fluidizado tem vantagens potenciais sobre outros sistemas, no tocante a tamanho de instalação, rendimento térmico e variedade de tipos de combustíveis que podem ser utilizados em um mesmo aquecedor.

A combustão em leito fluidizado é competitiva com outros sistemas, embora sua temperatura de operação seja mantida abaixo do limite de fusão do material inerte do leito, há uma compensação, no entanto, proporcionada pela alta eficiência de queima e pela excelente capacidade de transferência de calor para superfícies imersas no leito. Ela pode ser aplicada em caldeiras, aquecedores de água ou gás, geradores de gás quente para secagem, tratamento térmico de metais, incineração de resíduos, etc...

Como ocorre em muitos processos industriais, a combustão fluidizada é um exemplo em que a aplicação se deu sem o entendimento perfeito dos mecanismos das reações envolvidas. Por isso, embora o processo de queima fluidizada já esteja sendo implantado em vários países, incluindo o Brasil, torna-se necessário pesquisar os mecanismos das reações de combustão, em especial para os casos de partículas grandes de combustíveis vegetais, visando queima limpa e de alta eficiência.

Os objetivos deste trabalho se dirigem para esta área e visam:

- melhor entendimento de processo de queima de combustíveis vegetais;
- fornecer dados básicos sobre a caracterização de combustíveis vegetais, em especial com relação a sua queima em pedaços grandes em um leito fluidizado borbulhante, e
- obter parâmetros para o projeto de queimadores de leito fluidizado borbulhante.

Estudou-se nesta tese:

- A distribuição de massa do combustível vegetal dentro do leito;
- Os fatores que influenciam a taxa de queima do carbono fixo dos combustíveis vegetais;
- O efeito do atrito sobre a taxa de queima, e
- A devolatilização e queima da biomassa dentro de um leito fluidizado borbulhante.

Foram queimados os carvões vegetais de casca de Eucalipto Alba, Eucalipto Saligna, de endocarpo de Babaçu e de Sabugo de milho. Estudou-se também a queima de grafite, como um padrão comparativo.

Capítulo 2. Fundamentos sobre Fluidização e Combustão em Leito Fluidizado Borbulhante

Apresenta-se neste capítulo os fundamentos da combustão fluidizada. São revistos os conceitos sobre fluidodinâmica, transferência de calor, mecanismos de controle da reação de combustão, atrito e fragmentação do combustível dentro do leito e a modelagem da queima em leito fluidizado.

A informação referente a queima de combustíveis vegetais em leito fluidizado borbulhante é apresentada ao final do capítulo.

2.1 - Fluidodinâmica do Leito Fluidizado

Um leito de partículas sólidas oferece resistência ao escoamento de um fluido através dele. Se a velocidade de escoamento aumenta, aumenta também a força de arrasto exercida sobre as partículas. Quando o fluido se escoar 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 o novo aumento na velocidade do fluido, a expansão continua e alcança um estágio onde as forças de arrasto são suficientes para suportar o peso das partículas do leito. Neste estado, chamado de fluidização incipiente (ver Figura 2.1), o sistema fluido-partícula se comporta como um fluido. A velocidade do fluido nesse ponto é denominada velocidade mínima de fluidização U_{mf} .

Para velocidades maiores do que U_{mf} , a perda de carga P_b através do leito é aproximadamente igual ao peso do leito por unidade de área. Assim:

$$P_b.A = (m/\rho_p)(\rho_p - \rho_f).g \quad (2.1)$$

onde: ρ_p = densidade efetiva do material do leito;

ρ_f = densidade do fluido;

A = área da secção transversal do leito, e

m = massa das partículas do leito.

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 neste trabalho, a expansão uniforme é subitamente perdida (exceto para partículas muito finas $d_p \ll 1$ mm), e o sistema se torna instável, formando-se dentro do leito vazios contendo poucos sólidos, preenchidos quase totalmente por gás de fluidização. Estes vazios se parecem com bolhas e são assim chamados. As bolhas são responsáveis pela recirculação das partículas dentro do leito, razão das excelentes propriedades de transferência de calor do sistema fluidizado.

Se a velocidade do fluido é levada além do regime de bolhas, o leito é levado a uma situação onde as partículas são arrastadas na corrente e carregadas para fora do leito. Partículas menores são elutriadas a velocidades menores do 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.

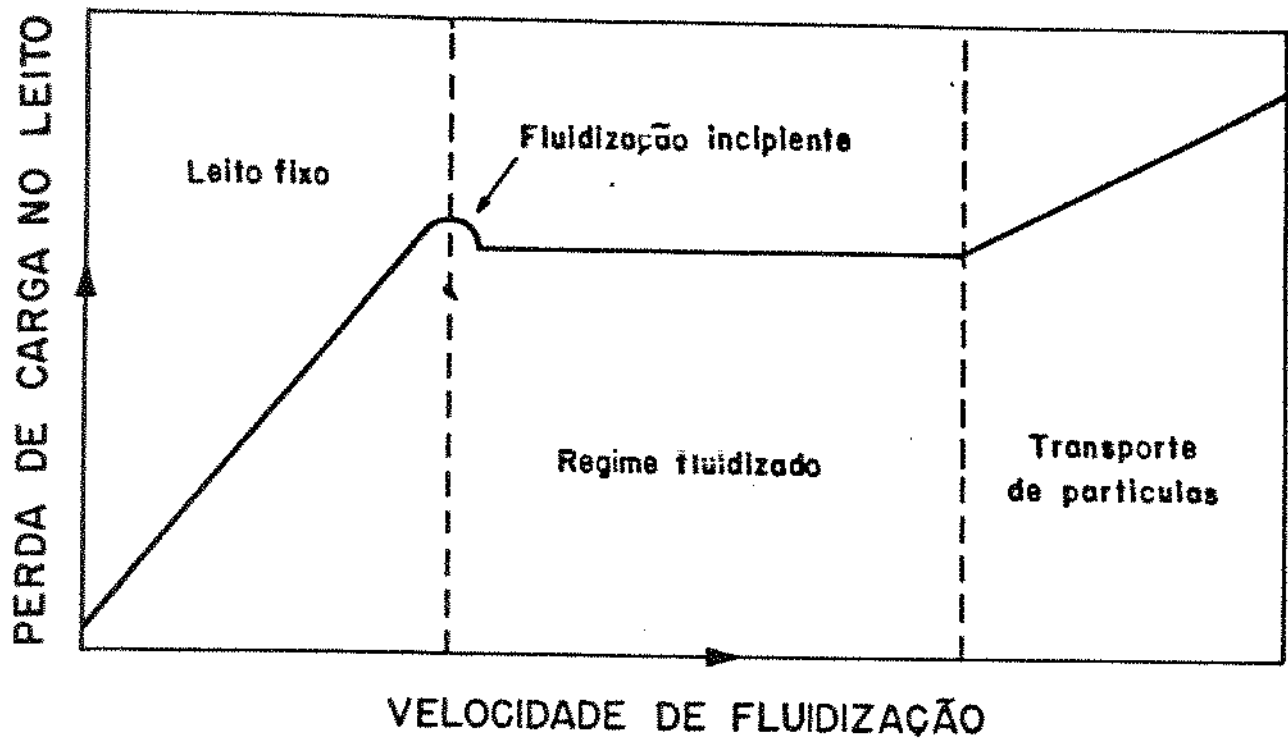


Figura 2.1: Esquema dos regimes de fluidização

O estado entre as condições extremas do leito fixo e a de carregamento e transporte de partículas é denominado regime de "leito fluidizado borbulhante", durante o qual a perda de carga através do leito é aproximadamente constante e suficiente para suportar o peso do leito.

A ação de bolhas, provocando o alto grau de mistura das partículas no leito, e a grande área superficial exposta por estas, são responsáveis pela grande 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 combustível ou de sólidos inertes, agem como fontes ou sorvedouros 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 adequadamente maiores do que a U_{mf} . Considerando-se que grande parte do gás de fluidização está passando contido nas bolhas, torna-se importante conhecer quão efetivo é o contato entre este gás e os sólidos que constituem o leito.

A interação das bolhas com a fase densa (emulsão) dentro do leito é fortemente determinada pela densidade e granulometria do material particulado de que este é constituído. Isto pode ser melhor entendido pela classificação proposta por Geldart (1972), Figura 2.2, para os diferentes tipos de particulados de um leito, onde U_b é a velocidade de subida da bolha, U_{mb} é a velocidade mínima para a ocorrência das bolhas e Emf é a porosidade do leito na condição de fluidização mínima.

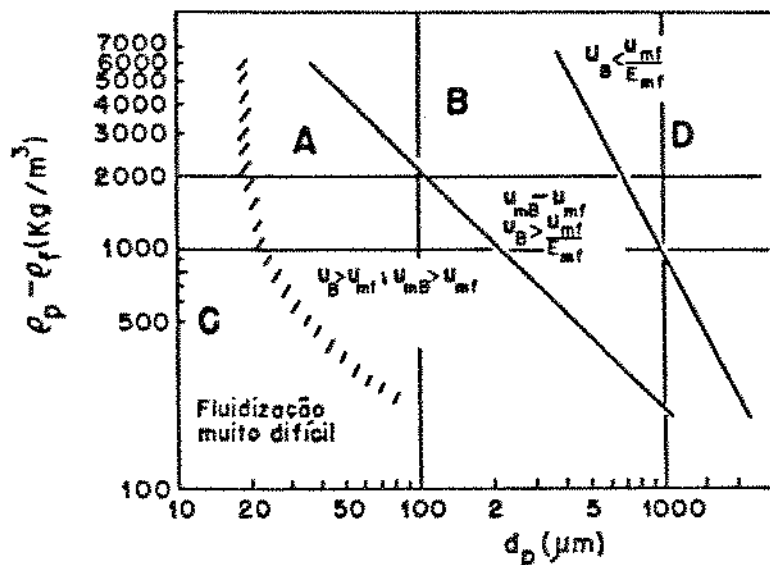


Figura 2.2: Diagrama de Geldart para a classificação do material particulado do leito

Na maioria das aplicações do leito fluidizado para a queima o material inerte do leito pertence aos tipos R e D (van Swaaij e Prins-1986).

Associado às interações entre a fase de bolhas e a de emulsão, estudos experimentais de Lewis e Partridge (1967) e Cranfield e Geldart (1974), mostraram que o padrão de escoamento de um gás associado com uma bolha, depende da razão entre velocidade de subida da bolha U_b , e a velocidade de mínima fluidização U_{mf} . Para razão $U_b \cdot E_{mf} / U_{mf}$ maior do que a unidade, i.e. para bolhas rápidas, forma-se uma região de recirculação de gás na fronteira da bolha com a fase densa. O gás na bolha recircula continuamente em seu interior e tem pequena penetração na fase densa (Figura 2.3a). Quando a razão $U_b \cdot E_{mf} / U_{mf}$ é menor do que a unidade, i.e. para bolhas lentas, os gases da emulsão passam através da bolha, entrando pela sua base e saindo pelo topo, conforme a Figura 2.3b.

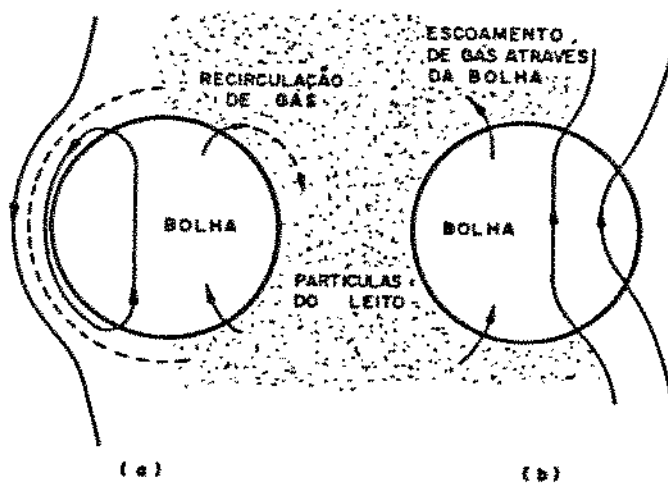


Figura 2.3: Padrão de escoamento do gás de fluidização associado à fase de bolhas: a) bolha com $U_b \cdot E_{mf} > U_{mf}$ b) bolha com $U_b \cdot E_{mf} < U_{mf}$.

2.2- Transferência de Calor em Leito Fluidizado

Nas condições normais de operação de um leito fluidizado borbulhante, o coeficiente de transferência de calor h , entre uma superfície imersa e o leito fluidizado a gás pode ser descrito como a soma de três componentes, conforme Rotterill (1975), a saber:

$$h = h_p + h_g + h_r \quad (2.2)$$

O componente condutivo h_p considera a transferência de calor devido ao movimento das partículas dentro do leito circulando até a superfície de troca; nesta, durante um curto intervalo de tempo, as partículas fornecem ou absorvem calor e a seguir retornam ao corpo do leito. Devido a esse processo o coeficiente de troca de calor é afetado pelo tamanho de partícula que constituem o leito, conforme pode ser visto na Figura 2.4.

É o movimento convectivo das partículas dentro do leito, o responsável pelo aumento característico da taxa de transferência de calor, quando o leito entra no estado de fluidização borbulhante (Figura 2.5). Na figura também é mostrado o efeito da pressão de operação do leito sobre o coeficiente de transferência de calor, para materiais do tipo II.

O componente convectivo h_g considera a transferência de calor para o gás percolando através da emulsão e da fase de bolhas. Como consequência o coeficiente de troca de calor varia com o tamanho das partículas. Partículas menores apresentam maior h_g devido a uma camada limite mais fina em torno da partícula. Este coeficiente varia também com a temperatura do gás, devido à variação de sua condutividade térmica.

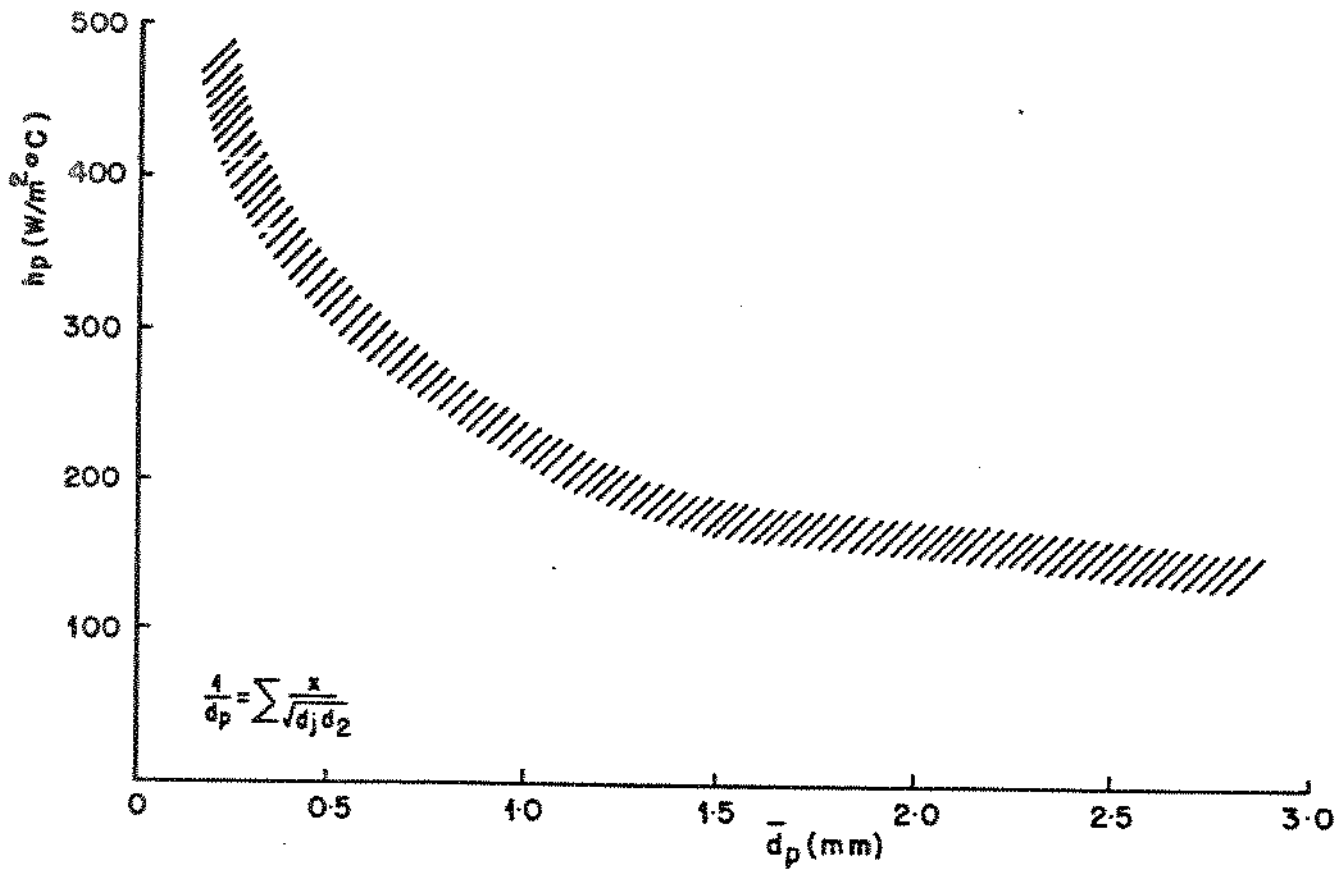


Figura 2.4: Relação empírica entre o coeficiente condutivo de transferência de calor e a granulometria do leito (Virt-1983)

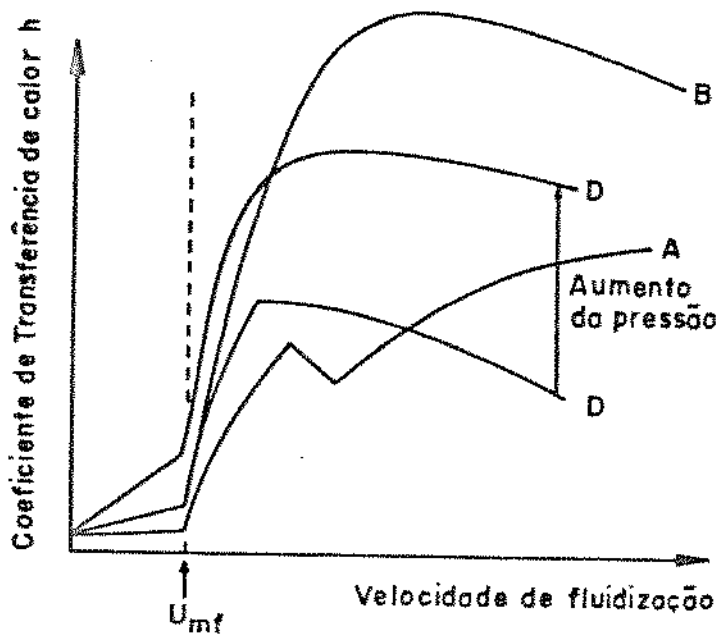


Figura 2.5: Gráfico da variação do coeficiente de transferência de calor do leito para uma superfície imersa, em função da velocidade de fluidização, para materiais do tipo A, B e D (Rotterill-1986)

Na Figura 2.6 é mostrada a dependência de $h_{max}=(h_p+h_g)$, (relativamente ao efeito de U) com a temperatura do leito e com o tamanho do particulado, para a troca térmica entre o leito e uma superfície. As curvas são provenientes da equação de Zabrodsky (1966):

$$h_{max} = 35,8 \cdot \rho_p^{0,2} \cdot K_g^{0,6} / d_p^{0,36} \quad (2.3)$$

onde ρ_p é densidade da partícula, K_g é a condutividade térmica do gás e d_p é o diâmetro médio da partícula. Os efeitos da radiação não são levados em conta pela equação. Os pontos escuros na figura foram obtidos com sensor de cobre de superfície oxidada e os pontos claros foram obtidos com sensor de ouro polido.

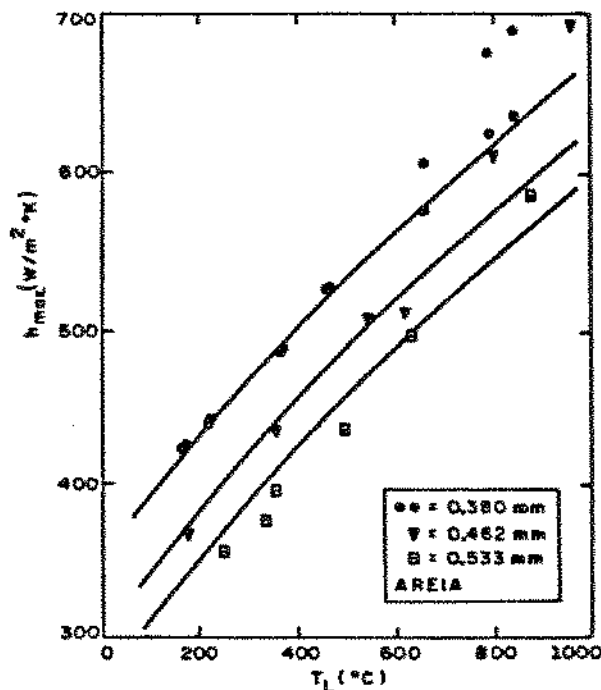


Figura 2.6: Efeito da temperatura e do tamanho de partícula sobre o coeficiente máximo de transferência de calor, do leito para uma superfície imersa (Botterill, Teoman e Yuregir-1981)

O componente h_r considera a transferência de calor devido à radiação no leito. Sua contribuição cresce rapidamente a partir de 600°C . Como pode ser observado na Figura 2.6, onde para valores de temperatura acima de 600°C , os pontos experimentais mostram valores superiores aqueles calculados apenas com base nas contribuições de h_p e h_g .

A importância da transferência de calor por radiação, é mostrada na Figura 2.7, como uma fração do coeficiente total de troca de calor.

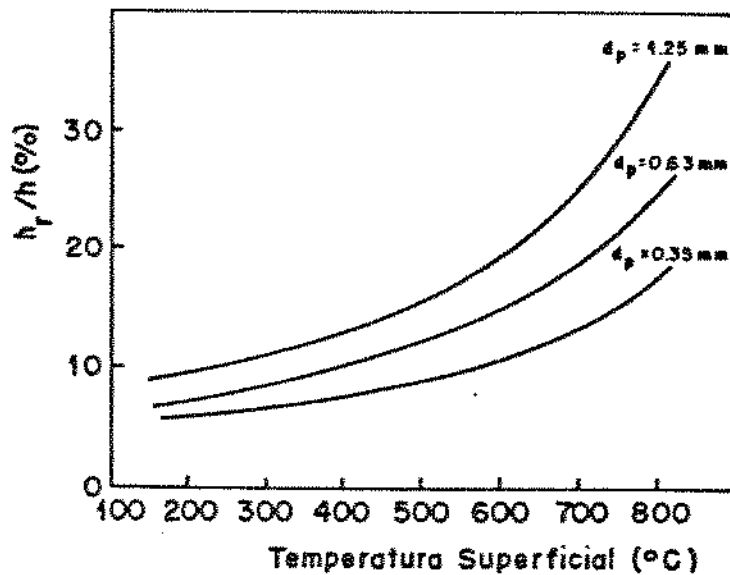


Figura 2.7: Transferência de calor por radiação h_r , em relação à transferência de calor total do leito a 850°C (Baskakov, Berg, Vinn, Phillipovsky, Kiraskosian, Goldobin e Suprun, 1973)

A transferência de calor em um leito fluidizado é importante, pois é do balanço entre a geração de energia na queima de um combustível e a transferência de calor de sua superfície para o leito, que se determina a temperatura na superfície do combustível.

Maiores detalhes sobre os fundamentos da fluidização poderão ser obtidos em Botterill (1975), Davidson, Clift e Harrison (1985) e Geldart (1986).

2.3 Mecanismo de Controle da Reação de Combustão

A reação de queima de um combustível sólido ocorre na superfície, enquanto a de um líquido ou de um combustível sólido pirrolizável ocorre na fase gasosa.

Para os combustíveis líquidos a vaporização ocorre na sua superfície enquanto no sólido pirrolizável a produção de gas (devolatilização) é um processo químico que ocorre em todo seu volume. Consequentemente, o problema da queima de um combustível sólido com alto teor de matéria volátil, como madeira, por exemplo, requer um conhecimento detalhado dos processos de transferência de calor e de massa interno (fase sólida) e externo (fase gasosa). Esses processos serão analisados mais adiante.

Após a devolatilização, o resíduo carbonoso possui as mesmas propriedades de um combustível sólido comum, e a sua queima pode ser explicada como ocorrendo em cinco etapas, na sequência:

- i- Difusão do oxigênio até a superfície do combustível;
- ii- Adsorção do oxigênio na superfície do combustível;
- iii- Reação do oxigênio adsorvido com o carbono sólido, formando os produtos (CO e CO₂);
- iv- Dessorção dos produtos da reação de oxidação; e
- v- Difusão dos produtos desorvidos a partir da superfície.

Como essas etapas ocorrem em sequência, a taxa de queima é controlada pela etapa mais lenta. No caso do carbono as etapas (ii) e (iv) são extremamente rápidas (Kanury, 1977).

As etapas (i) e (v) são processos físicos de transferência de massa, e a etapa (iii) é um processo químico.

Para condições de baixa temperatura, partícula de combustível de tamanho pequeno e atmosfera estagnante, a etapa química é muito mais lenta que as etapas (i) e (v). Diz-se então que a taxa de queima é química ou cineticamente controlada. Nessas condições a concentração de oxigênio na superfície da partícula é igual ou semelhante àquela da corrente do gás.

Para as condições de temperatura alta, partículas grandes de combustível e alta velocidade do gás, a etapa (iii) é muito mais rápida que as etapas (i) e (v). A taxa de queima é controlada pela difusão do oxigênio até a superfície da partícula e diz-se que o controle é difusional. Nessas condições a concentração de oxigênio na superfície da partícula é praticamente nula.

As duas situações são qualitativamente descritas na Figura 2.8, onde $C_O(r)$ e $T(r)$ são a concentração de oxigênio e a tempe

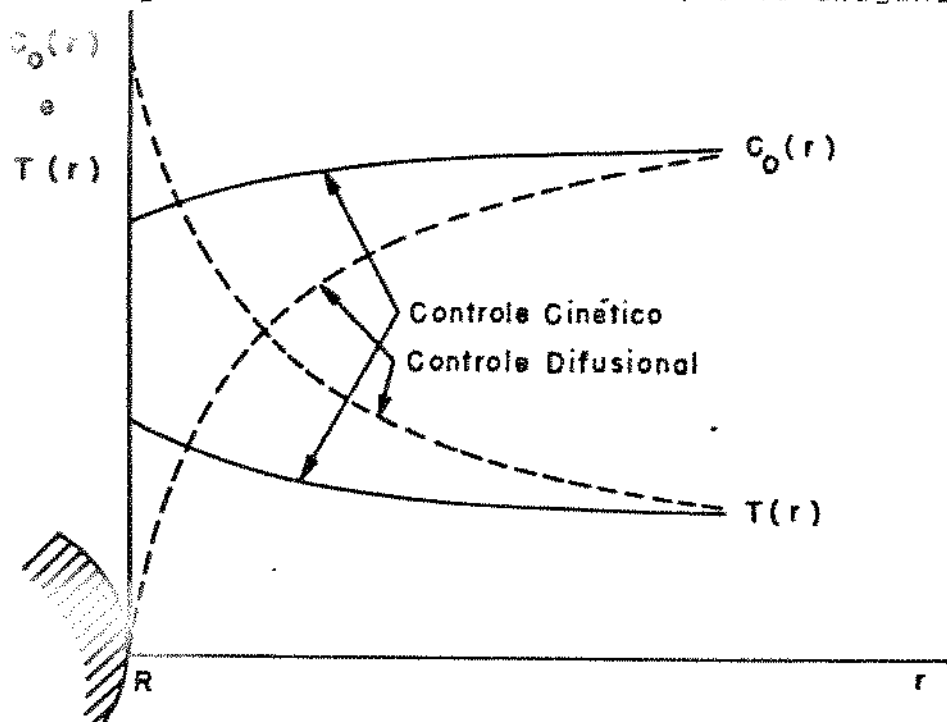


Figura 2.8: Características dos regimes cinéticos e difusional de queima de uma partícula de combustível (Kanury- 1977)

ratura do meio em função da distância medida a partir da superfície da partícula de combustível.

A taxa de queima no regime cinético depende fortemente da temperatura. No regime de controle difusional a taxa de queima é fracamente dependente da temperatura e fortemente dependente da granulometria do combustível, como mostrado na Figura 2.9.

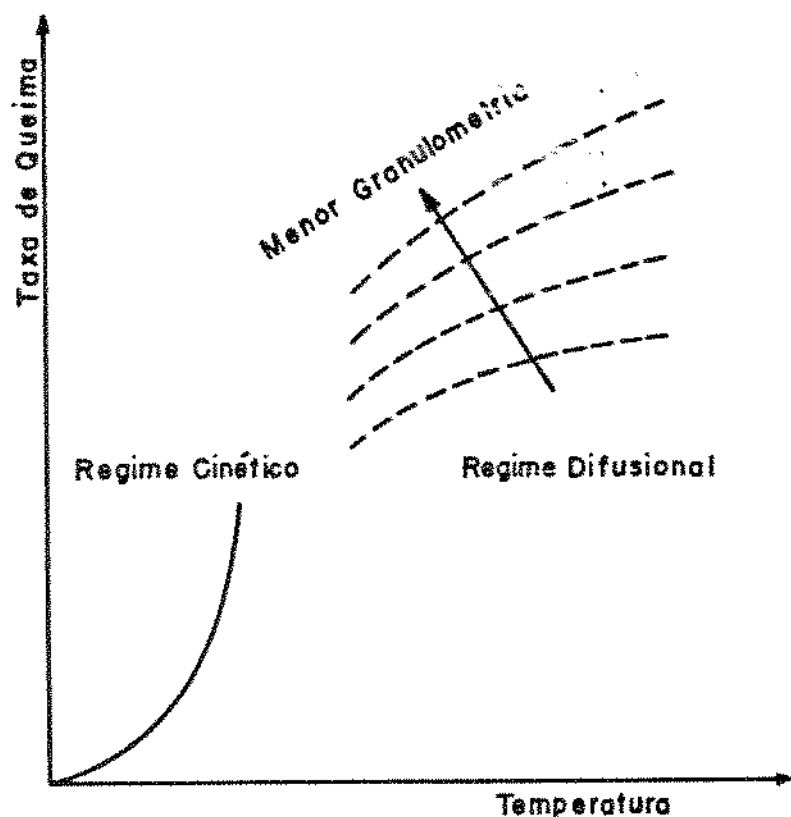


Figura 2.9: Taxa específica de queima em função da temperatura, para os regimes cinéticos e difusional (Kanury- 1977)

As considerações feitas não levaram em conta o fato de que, os combustíveis sólidos após sofrerem devolatilização, apresentam uma estrutura porosa. A presença de poros no combustível sólido acrescenta um regime de controle intermediário (região B) entre a situação de controle difusional (região C) e a de controle ciné-

tico (região A), como mostrado na Figura 2.10, onde M ($\text{g}/\text{cm}^2.\text{s}$) é a taxa específica de queima, a é o valor de $C_O(r)$ na corrente de gás e b é o valor de $C_O(r)$ em $r=0$. T é a temperatura do gás onde está imerso o combustível.

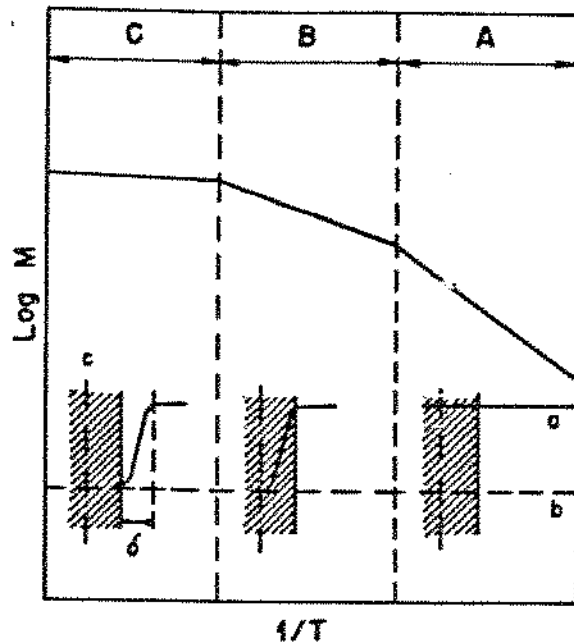


Figura 2.10: Diagrama de Arrhenius, mostrando os regimes de controle das reações de um combustível sólido poroso (Mulcahy e Smith, 1969).

Na região A, onde se tem baixas temperaturas, a velocidade das reações químicas é baixa, e o oxigênio contido na corrente do gás consegue se difundir através da estrutura porosa antes que ocorra a reação. A concentração de oxigênio dentro dos poros é praticamente igual à da corrente de gás. Nesta condições, o controle da taxa de queima é cinético.

Na região B, a velocidade das reações químicas aumenta com a temperatura e provoca um gradiente de concentração do oxigênio dentro dos poros, com concentração nula no centro da partícula e igual à da corrente de gás na superfície. Em consequência, a taxa

de queima na superfície interna da partícula é controlada pelo coeficiente de difusão interna do oxigênio, enquanto na fronteira externa a taxa ainda é controlada quimicamente.

Na região C, o crescimento exponencial da velocidade das reações químicas em função da temperatura, torna a difusão externa do oxigênio para a superfície da partícula a etapa mais lenta e, portanto, controladora da taxa de queima.

O gradiente de concentração de oxigênio na camada limite (δ) vai de zero na superfície do combustível, até o valor da concentração na corrente de gás na sua fronteira externa.

2.4- Mecanismo de Controle da Combustão em Leito Fluidizado

Para melhorar o desempenho dos reatores de leito fluidizado atuais é necessário entender melhor os processos que ocorrem durante a queima. Na Figura 2.11 tem-se um exemplo de combustor com leito fluidizado, que opera tipicamente com velocidade superficial de gás entre 2 e 3 m/s e uma temperatura de leito de cerca de 900°C. Queima carvão mineral com granulometria próxima de 10 mm em um leito constituído basicamente de partículas de cinzas de carvão, com d_p médio de 0,75 mm. A energia da queima deixa o leito como calor sensível do gás de saída ou é extraída dentro do próprio leito.

A concentração de carbono no leito é em geral inferior a 4-5%, e cada pedaço de combustível está envolto por muitas partículas inertes, móveis, e esta é a característica principal que diferencia a combustão em leito fluidizado dos outros sistemas.

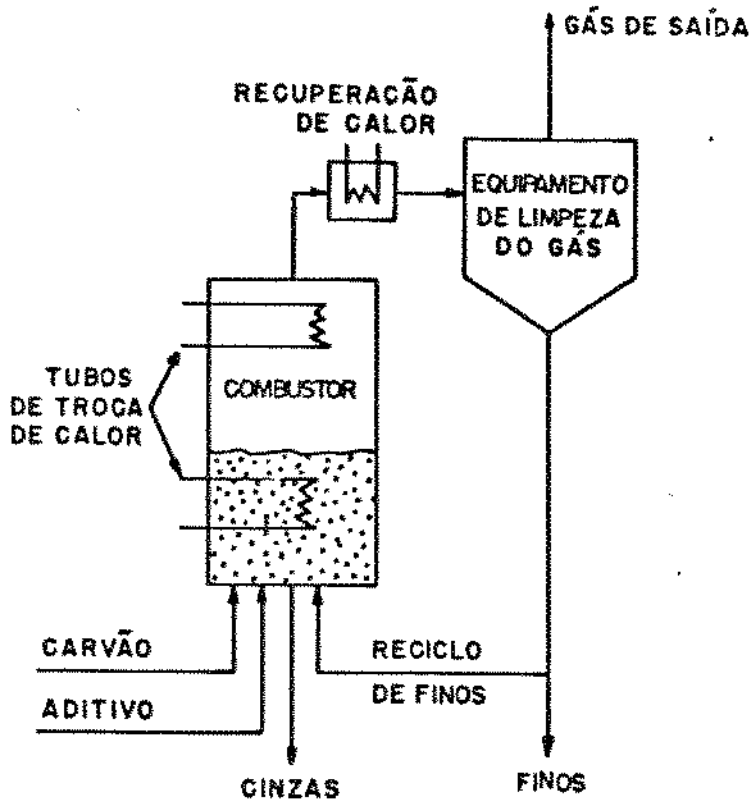


Figura 2.11: Esquema de uma caldeira com combustão em leito fluidizado borbulhante (La Nauze 1985a)

Embora muita pesquisa tenha sido realizada nas últimas duas décadas sobre a queima do carbono, basicamente sobre a cinética das reações entre carbono e oxigênio, ainda hoje é necessário o desenvolvimento de estudos para o conhecimento detalhado da transferência de calor e de massa, bem como dos processos químicos que ocorrem na superfície e em torno de uma partícula de combustível queimando dentro de um leito fluidizado.

Ao se aquecer, o carvão mineral se decompõe produzindo um resíduo sólido rico em carbono e um gás rico em hidrogênio, que constitui a matéria volátil. Partículas de carvão mineral com dimensões entre 5 e 10 mm alimentadas a um leito fluidizado a 900°C experimentam um taxa de aquecimento de 10^2 °C/s.

Em torno de 500°C, praticamente toda a matéria volátil do combustível é liberada dentro do leito fluidizado; o tempo para a

evolução completa dos voláteis pode variar desde alguns segundos até 200 s, dependendo da granulometria do combustível alimentado. Na presença de oxigênio e de temperatura adequada para a sua ignição, a queima dos voláteis dentro do leito ocorre de maneira imediata, enquanto o resíduo sólido continua a queimar por um período de 10 a 20 vezes maior que o tempo de devolatilização total. Em comparação com a queima pulverizada, onde os tempos de devolatilização e de queima são de 0,1 a 1 s, respectivamente, os tempos característicos para a combustão em leito fluidizado são, portanto, grandes.

Esse tempo mais longo, especialmente para a queima de sólidos, pode resultar em perdas comparativamente maiores no combustível não queimado, carregado pelo gás de saída. Davidson e Harrison (1963) estabeleceram para o leito fluidizado constituído de partículas finas o modelo físico denominado de duas fases. Uma das fases é chamada de emulsão ou fase densa, contendo a grande maioria das partículas no leito, e teria as mesmas propriedades do leito na condição de fluidização incipiente.

A outra fase, denominada fase de bolhas, é formada pelo excesso de fluxo de gás em relação ao necessário para estabelecer a U_{mf} , ou seja $(U - U_{mf}) \cdot A$, onde A é a área da seção transversal do leito. Aceita-se a ocorrência de troca de gases entre as duas fases, e que a determinação da concentração de oxigênio necessita de uma estimativa da resistência à transferência de massa entre a fase de bolha e a fase densa e na superfície da partícula de combustível queimando.

Ao alcançar a superfície da partícula, parte do oxigênio pode penetrar nos poros abertos antes de reagir com carbono. Nessa

situação a resistência à difusão nos poros e a reatividade química do combustível irão influenciar a taxa de queima global, conforme Turkdogan, Olson, Vinters (1970), Mulcahy e Smith (1969) e Walker, Rusinko e Austin (1959).

Em temperaturas abaixo das usadas na combustão em leito fluidizado, a taxa de reação é limitada pela taxa das reações químicas (controle cinético). Ao se aumentar a temperatura as reações químicas se tornam mais rápidas e a difusão nos poros e externamente às partículas de combustível passa a ter uma influência maior sobre a taxa de queima.

A temperaturas ainda maiores a taxa de reação passa a ser determinada pela difusão externa do oxigênio e, nessas circunstâncias, a velocidade das reações químicas e a difusão nos poros não mais controlam a taxa, conforme Walker, Rusinko e Austin (1959).

2.4.1- Queima da Matéria Volátil do Carvão Mineral em Leito Fluidizado Borbulhante.

Quando partículas de carvão são alimentadas em um combustor a leito fluidizado, elas são aquecidas e passam pela etapa de secagem e devolatilização, seguidas da ignição e queima dos voláteis e da queima do carbono fixo residual.

Os mecanismos da evolução e combustão dos voláteis não são completamente conhecidos, devido à grande variação na quantidade e na composição dos gases, em função do tipo de carvão, da temperatura e da taxa de aquecimento.

Segundo os trabalhos de Stubington (1980) e Stubington e Sumariono (1989), a composição dos voláteis pode ser descrita como constituída principalmente de: CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄ e alcatrão. Segundo Field, Gill, Morgan e Hawksley (1967) a presença de hidrocarbonetos e de CO e H₂ na constituição dos voláteis, determina limites da flamabilidade entre 2 e 70% em volume.

Considerando que:

- i) a energia contida nos voláteis pode fornecer até 50% da energia total de queima do carvão e estequiometricamente irá necessitar de uma quantidade correspondente de oxigénio contido no gás de fluidização, e
- ii) segundo Field, Gill, Morgan e Hawksley (1967), Park, Levenspiel e Fitzgerald (1981) e Pillai (1985), as taxas de queima dos gases são muito maiores do que as taxas de devolatilização e do que as taxas de queima do combustível sólido.

verifica-se que a queima dos voláteis dentro do leito, determina a concentração média do oxigénio disponível para a queima do carbono fixo.

Devido ao seu alto conteúdo energético é importante conhecer onde queimam os voláteis. Estudos realizados por Prins, Casterleijn, Draijer e van Swaaij (1985) mostram que os voláteis podem queimar :

- acima da superfície do leito na forma de uma chama de difusão, acompanhando o movimento da partícula de carvão;
- dentro de bolhas ainda associadas à presença de partículas grandes de carvão
- como chama pré-misturada acima da superfície do leito, se parada da partícula de carvão, que está contida na emulsão alguns centímetros abaixo. Não foi observada a queima dos voláteis na emulsão. Como justificativa para explicar por que os voláteis não queimam na emulsão os autores supõe que as perdas de calor do gás para o leito de inertes na emulsão é excessiva e não permite a formação de chamas.

As condições para que a combustão dos voláteis seja completa incluem: temperaturas acima de 700°C , disponibilidade de oxigênio, boa mistura dos gases com O_2 , e tempo de residência na região suficiente para que a reação de oxidação se complete.

Os fatores que podem alterar as condições acima são:

- liberação muito rápida dos voláteis no ponto de alimentação, provocando localmente a má qualidade da mistura dos gases e dificultando o acesso ao oxigênio. Isso ocorre principalmente com a alimentação do combustível em pedaços pequenos ($< 5\text{ mm}$).
- segregação do combustível no topo do leito, dificultando a sua distribuição no leito e provocando novamente os problemas anteriores. Quando ocorre a segregação na superfície do leito aumenta a possibilidade de que os voláteis escapem do leito sem queimar.

- a troca de gases entre a fase de bolha e a emulsão, dificultada no regime de bolhas rápidas.

Para condições de operação do leito com boa recirculação do combustível, oxigênio disponível, temperatura igual ou maior que 735°C (temperatura de ignição dos voláteis segundo Frins, Siermons, van Swaaij e Radovanovic- 1989), os fatores controladores da taxa de queima dos voláteis são:

- a taxa de evolução dos voláteis, segundo Essenhig (1981) e La Nauze (1985), e
- a mistura de voláteis com oxigênio dentro do leito, conforme Stubington (1980).

2.4.2- Expressões para a Taxa de Queima

Nas condições representadas na Figura 2.12 a taxa de queima, M , em termos de consumo de massa de carbono por unidade de tempo e área externa da partícula, é dada por:

$$M = \Delta K_{III} (C_p - C_s) \quad (2.4)$$

quando o mecanismo controlador é a transferência de oxigênio até a partícula, e por:

$$M = K_C (C_s)^n \quad (2.5)$$

quando o controle da taxa de queima é a velocidade da reação química.

Nestas equações:

C_s = concentração de O_2 na superfície externa da partícula ($kgmol/m^3$);

C_p = concentração de O_2 no gás de fluidização ($kgmol/m^3$);

n = ordem aparente da reação;

K_m = coeficiente de transferência de massa para a difusão de O_2 na direção da superfície do combustível (m/s);

Δ = fator numérico: $\Delta = 3/4$ quando o produto da reação é CO e

$\Delta = 3/8$ quando o produto da reação é CO_2 .

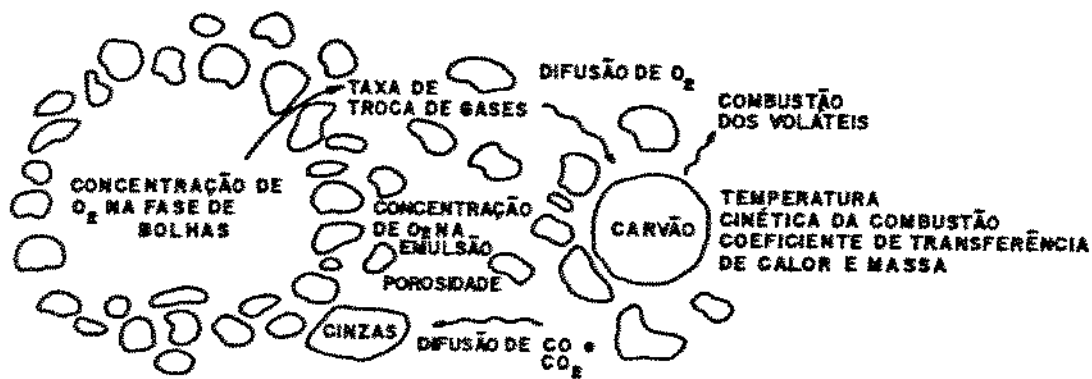


Figura 2.12: Esquema de uma partícula de carvão queimando em um leito fluidizado, ilustrando o processo de difusão e alguns dos parâmetros importantes nos modelos de combustão em leito fluidizado (La Nauze 1985_b).

O coeficiente cinético K_c é geralmente expresso na forma de Arrhenius:

$$K_c = K_0 \exp(-E_a/RT_p) \quad (2.6)$$

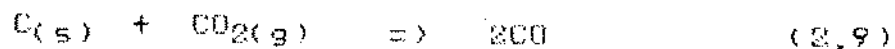
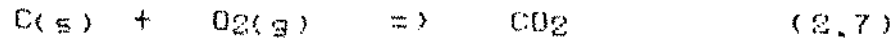
onde K_0 = valor limite de K_c para $1/T_p \rightarrow 0$;

E_a = energia de ativação aparente;

T_p = temperatura da partícula, e

R = constante universal dos gases.

Na Figura 2.12, após a evolução dos voláteis, o consumo de carbono pode ocorrer segundo várias reações possíveis. As principais são:



As reações (2.7) a (2.10) são reações chamadas heterogêneas e ocorrem na interface sólido-gás, nas superfícies externa e interna da partícula, segundo os mecanismos descritos anteriormente na seção 2.3.

As reações descritas em (2.11) e (2.12) são reações homogêneas, de oxidação do CO e do H_2 , na fase gasosa.

Estudo realizado por Arthur (1951) e por Lewis, Gilliland e Paxton (1954), mostram que CO e CO_2 são ambos produtos primários da reação de oxidação do carbono.

As expressões (2.4) da taxa de queima em função da transferência de massa e (2.5) da taxa de queima em função da velocidade das reações químicas, necessitam do conhecimento da concentração de O_2 na superfície, C_s , que em geral é desconhecida.

As equações (2.4) e (2.5) podem ser transformadas para eliminar C_s , dando:

$$M = K_C (1-x)^n C_p^n \quad (2.13)$$

$$\text{onde } x = M/w_m \quad (2.14)$$

$$\text{e } w_m = K_m C_p \quad (2.15)$$

w_m é o limite difusional para a taxa de queima, obtido quando as reações químicas são tão rápidas que C_s tende a zero e a taxa de queima é controlada somente pela transferência de massa do oxigênio para a superfície da partícula.

A equação (2.13) pode ser usada para fornecer relações de M em função da ordem n da reação. Para uma reação de primeira ordem ($n=1$), tem-se:

$$M = \frac{C_p}{(1/K_m) + (1/K_C)} \quad (2.16)$$

2.4.3- Transferência de Massa em um Leito Fluidizado Borbulhante

a) Transferência de Massa da Fase Gasosa para a Superfície da Partícula de Combustível.

Se a concentração superficial de O_2 na superfície da partícula é zero, a taxa de queima será controlada pela difusão de oxigênio através da camada limite em torno da partícula de combustível. Nestas condições a taxa de queima controlada pela transferência de massa, w_m , é dada pela equação (2.15):

$$w_m = K_m \cdot C_p$$

Para se calcular a taxa de difusão de oxigênio para a partícula queimando, o coeficiente de transferência de massa, K_m ,

deve ser conhecido como uma função de parâmetros característicos de operação do leito, tais como: velocidade de fluidização, propriedades do gás, e os tamanhos das partículas de carbono e de inertes.

O enfoque mais comum tem sido o de determinar K_m a partir das relações dadas em função do número de Sherwood, S_h , definido por:

$$S_h = K_m \cdot d / D \quad (2.17)$$

onde D = Coeficiente de difusão molecular do oxigênio em N_2 (cm^2/s), e

d = diâmetro da partícula de carbono

Para uma partícula isolada em um gás, na ausência de convecção forçada, $S_h=2$.

Na difusão para uma única partícula esférica fixa em um fluido, S_h pode ser expresso (Frossling-1938, Rowe, Claxton e Lewis, 1965) como uma função da vazão de gás e do diâmetro da partícula através do número de Reynolds, Re , e das propriedades do fluido através do número de Schmidt, Sc , na forma:

$$S_h = 2 + K Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (2.18)$$

onde K é uma constante empírica, tomada em geral como 0.69.

Avedesian e Davidson (1973) propuseram que o número de Sherwood para uma partícula queimando num leito fluidizado borbulhante, corresponde a uma situação onde os efeitos da convecção natural e forçada são desprezíveis. Este ponto de vista é consistente com os cálculos do número de Reynolds efetivo para uma partícula pequena, se a velocidade característica for a velocidade mínima

de fluidização, U_{mf} . Nestas condições Re tem valores da ordem de 1. Os autores fundamentaram seu ponto de vista supondo que o número de Sherwood permanece constante durante todo o tempo de queima.

Os autores propõem que o valor $S_h = 2$, encontrado na ausência de um leito fluidizado, deveria ser multiplicado pela razão entre a difusividade efetiva do oxigênio no leito, D_g , e do oxigênio em nitrogênio, D , tal que:

$$S_h = (2D_g/D) = 2 E_{mf} \quad (2.19)$$

Tabela 2.1: Expressões empíricas do número de Sherwood (S_h) para uma partícula esférica de carbono, queimando em um leito fluidizado. (La Nauze 1985 a)

Referências	Expressão para S_h	observações
Avedesian & Davidson(1973)	$2(D_g/D)=2E_{mf}$	$S_h=constante$
Gordon & Amundson(1976)	2	-----
Yagi & Kunii (1955) e Leung & Smith (1978)	$2+0,6k_p^{1/2}S_c^{1/3}$	veloc. caract. para Re não definida
Longalidis & Geogakis (1981)	$2+0,6(R_e/E_{mf})^{1/2}S_c^{1/3}$	E_{mf} =porosidade da fase de emulsão
Chakraborty & Howard (1981)	$2E+0,69R_e^{1/2}.S_c^{1/3}$	E =porosidade do leito
Pillai (1981)	$2E+0,69.E.R_e^{1/2}S_c^{1/3}$	$E \sim 0,7$
La Nauze & Jung (1982)	$2E+0,69(R_e/E)^{1/2}S_c^{1/3}$	
La Nauze & Jung (1983)	$2E_{mf}+0,69(R_e/E)^{1/2}S_c^{1/3}$	

onde U_g é aproximadamente U_{mf} . Esta aproximação foi proposta anteriormente por Kunii & Levenspiel (1969).

Alternativamente, outros autores tem proposto que S_h calculado para a combustão de uma partícula isolada em um escoamento como na equação (2.18) pode ser adaptado para a combustão de uma partícula em um leito fluidizado, pela inclusão da porosidade do leito, obtendo desta forma um S_h que leva em conta a presença das partículas do leito.

Algumas expressões usadas para o cálculo de S_h são apresentadas na Tabela (2.1).

Modificações da equação (2.18) são tentativas de considerar a influência exercida pelos inertes do leito em torno da partícula de combustível, no coeficiente de difusão e na velocidade do gás relativa à sua superfície, através de K ou E_{mf} .

Uma outra tentativa de adaptação foi realizada por La Nauze, Jung e Kastl (1984) através do cálculo da velocidade característica do K_p a partir da teoria de Clift, Ghadiri, Monteiro, Ian e Tambimuther (1983). A teoria sugere que a velocidade do gás na emulsão aumenta devido ao escoamento do gás entre bolhas vizinhas levando a uma velocidade média, U , dada por:

$$U = U_{mf} (1 + 1,5 E_b^{2/3}) \quad (2.20)$$

onde E_b é a fração de volume de bolhas

A base para estas abordagens empíricas é:

- i) a existência de uma camada limite que se desenvolve e possibilita o uso de um modelo de difusão em regime permanente;
- ii) a equação para uma partícula isolada na ausência do leito fluidizado pode ser modificada para um leito borbulhante;
- iii) o leito de partículas pode isolar parcialmente o carbono do gás e isto pode ser levado em conta pelo uso de um termo com a porosidade;
- iv) o efeito da convecção forçada pode ser incluído pela escolha de uma velocidade média característica do gás.

Nas expressões da Tabela (2.1) pode-se observar que tem sido considerado que o número de Sherwood consiste de um termo Sh ou Sh_{mf} para a transferência de massa na ausência da convecção forçada, quando a camada limite estagnante tem espessura infinita, e de um termo de velocidade, que corresponde ao componente convectivo o qual, na ausência do leito fluidizado, pode ser deduzido da teoria da camada limite de Prandtl para o escoamento em torno de uma esfera.

b) Perfil de Concentração dos Gases em Torno da Partícula de Combustível.

Os perfis de concentração para CO, CO₂ e O₂, em torno da partícula de carvão mineral queimando, podem ser calculados através de balanços de massa e energia para cada gás, como nos trabalhos de Basu, Broughton e Elliot (1975); Gordon e Amundson (1981), Caram e Amundson (1977); Gordon, Caram e Amundson (1978),

Bukur e Amundson (1981); Calleja, Sarofim e Georgakis (1981) e de Ross e Davidson (1982).

Waters (1975), Caram e Amundson (1977) e Calleja, Sarofim e Georgakis (1981), reviram os mecanismos básicos propostos para a queima do resíduo carbonoso.

Nos modelos de película simples ("single film"), as partículas de carbono reagem diretamente com O_2 para formar CO e CO_2 . Os dois extremos, quando ou CO ou CO_2 são produzidos, foram considerados por Ross (1979), Ross e Davidson (1982) e Calleja Sarofim e Georgakis (1981). Estes pesquisadores ampliaram suas análises para incluir a oxidação do CO dentro da camada limite, possibilitando considerar que tudo se passa como se CO_2 fosse o único produto da reação. A forma dos perfis de concentração para este caso é dado na Figura 2.13.a.

Uma abordagem alternativa, conhecida como modelo da película dupla ("Double film") foi usada por Avedesian e Davidson (1973) para descrever as reações ao redor da partícula. Nesta abordagem se supõe que o oxigênio difundindo em direção à partícula, é consumido na película externa antes de alcançar a sua superfície, produzindo CO_2 . O CO_2 produzido nesta queima se difunde na direção contrária à partícula e também para a superfície da partícula através da película interna, onde reage para formar CO:



Os perfis de concentração para esse modelo, são apresentados na Figura 2.13b.

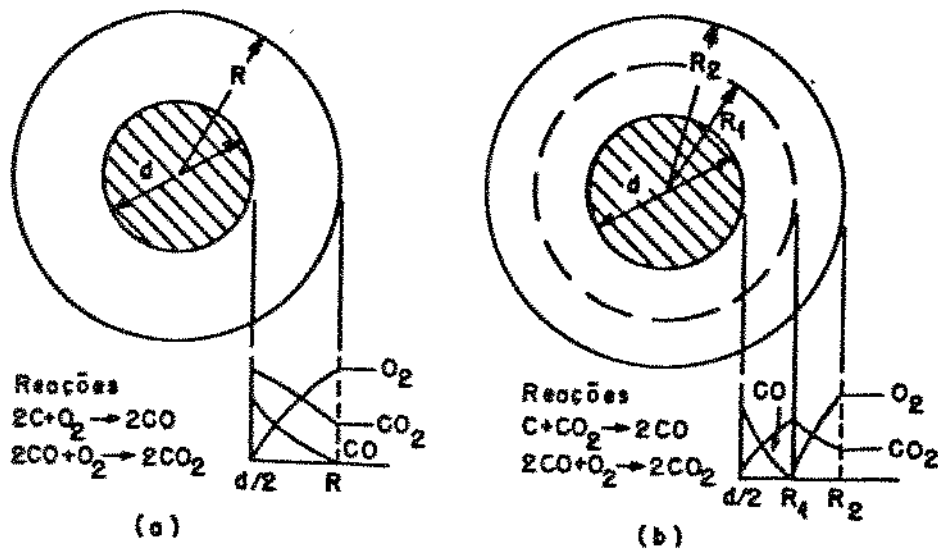
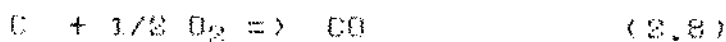
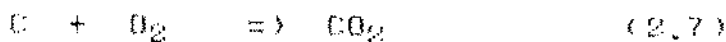


Figura 2.13: Perfis de concentração para O_2 , CO e CO_2 , em torno de uma partícula esférica de carbono, queimando em regime de controle difusional. a) modelo de película simples com oxidação do CO e b) modelo de película dupla. (La Nauze 1985b)

Contudo os resultados experimentais de Khitrin e Golovina (1964), apresentados na Figura 2.14, e os estudos de Basu, Broughton e Elliot (1975) mostram que as temperaturas das partículas queimando em leito fluidizado, nas condições usuais de operação ($750^\circ C < T_L < 1000^\circ C$), não são suficientemente altas para que a reação acima seja dominante na combustão. Segundo os dados da Figura 2.14, para temperaturas menores que $1127^\circ C$ (1400 K) as únicas reações significativas seriam:



típicas do modelo de película simples.

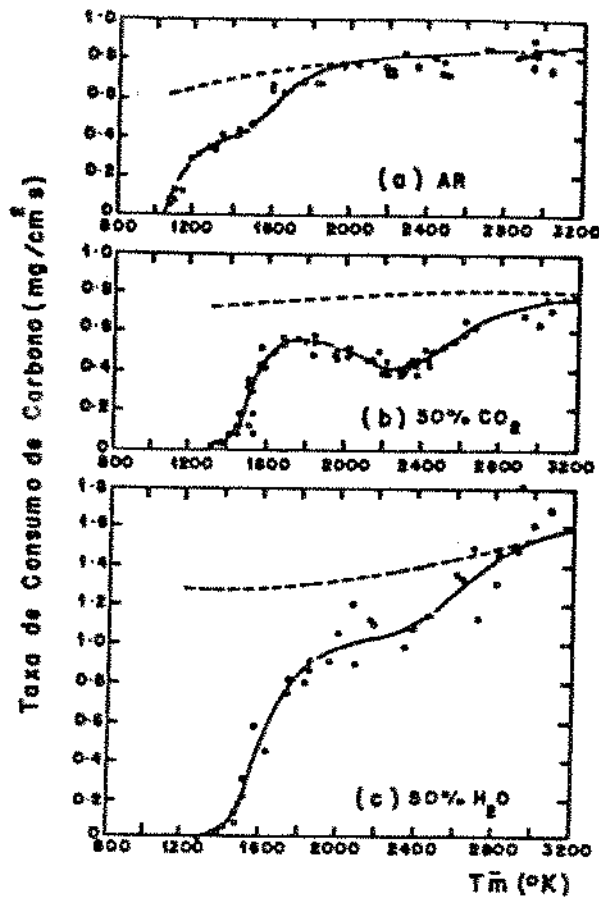
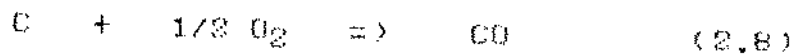


Figura 2.14: Dados fornecidos por Khitrin & Golovina (1964) para as taxas de reação de uma esfera de carbono com ar, dióxido de carbono e vapor de água à pressão atmosférica. (Field, Hill, Morgan e Hawksley-1967)

Um modelo alternativo envolvendo as reações:



foi apresentado por Caram e Amundson (1977). A solução geral obtida permite definir um intervalo de valores possíveis para as temperaturas na superfície das partículas de carbono; os limites do intervalo correspondem às soluções do modelo de película simples e de película dupla, Calleja, Sarofin e Georgakis (1981).

A partir da solução dos balanços de massa e de energia, os modelos permitem várias soluções possíveis para as temperaturas na superfície das partículas.

É sugerido que para partículas grandes (diâmetros maiores do que 5mm) o CO queimará em torno da partícula, enquanto para partículas pequenas entre 50 a 100 μm , o CO escapará da camada limite.

A sugestão de que a oxidação de CO seguindo a equação (2.10) ocorre próximo da superfície da partícula, i.e. dentro da camada limite, é equivalente a considerar que a queima de carbono ocorre segundo a equação:



Os dados de Field, Gill, Morgan e Hawksley (1967) corroboram a idéia da oxidação de CO dentro da camada limite para partículas maiores do que 1 mm, indicando que na queima de partículas grandes, como é usual na queima de biomassa, a oxidação do carbono ocorre predominantemente segundo a equação (2.7).

No entanto, dada a incerteza que existe com relação aos vários mecanismos envolvidos na combustão, mesmo em sistemas bem caracterizados, a falta de dados básicos de transferência de calor e de massa em leito fluidizado impede uma verificação definitiva dos perfis de concentração dos gases em torno das partículas queimando nos combustores de leito fluidizado.

c) Troca de Oxigênio Entre as Fases de Bolhas e de Emulsão.

A troca de gás entre as fases de bolha e de emulsão pode ser calculada pela aplicação da teoria das duas fases ou a partir de correlações empíricas. O padrão de escoamento de um gás dentro de um leito fluidizado, em especial nas vizinhanças de uma bolha, tem sido estudado em modelos a frio. Dois padrões distintos de escoamento de gás na proximidade de uma bolha podem ser observados experimentalmente e previstos pela aplicação da teoria do escoamento potencial, de acordo com Davidson e Harrison (1963).

As linhas de corrente do gás, Figura 2.3, podem ser caracterizadas através da razão entre a velocidade do fluido na fase densa (emulsão) e a velocidade de ascensão das bolhas U_b .

Quando as bolhas sobem mais lentas que a velocidade do gás na emulsão, i.e. $(U_{mf}/E_{mf}U_b) > 1$, as bolhas fornecem um caminho de menor resistência para o escoamento do gás. Figura 2.3.b. Contudo, quando a bolha se move mais rápido que o gás que percola a emulsão, i.e. $(U_{mf}/E_{mf}U_b) < 1$, ocorre a recirculação do gás dentro da bolha, conforme a Figura 2.3.a. Neste caso pode ocorrer que o gás contido nas bolhas atravesse o leito sem reagir com o combustível.

2.4.4. Atrito e Fragmentação

Praticamente todos os processos comerciais utilizando leitos fluidizados, operam em condições tais que parte do material contido no leito é elutriado com o gás de saída. A recuperação do material elutriado é sempre necessária, seja por causa do valor deste material, do seu conteúdo energético ou simplesmente para limpar o gás liberado para a atmosfera.

Para projetar os sistemas de separação e coleta dos sólidos contidos no gás é necessário estimar a taxa de elutriação das partículas do leito e a sua distribuição granulométrica.

Em um combustor de leito fluidizado há vários processos que podem alterar a distribuição granulométrica dos sólidos no seu volume. Para o carvão esses processos são:

- a combustão do carvão;
- a quebra ou fragmentação do carvão;
- o atrito, que corresponde à retirada de partículas muito pequenas de carvão, por vários mecanismos descritos a seguir.

A importância do conhecimento da taxa de geração de finos na combustão de carvão deve-se basicamente à sua influência na eficiência de queima do reator e na determinação experimental da taxa de queima.

Os finos de carvão carregados no gás sem que ocorra a queima, diminuem a eficiência energética do reator por levarem consigo calor sensível e a energia química não liberada. A eficiência de queima pode ser melhorada através da separação e realimentação dos finos ao leito, como mostrado por Valk, Radovanovic e

Alblas (1986).

Nas medidas das taxas de queima dos diferentes tipos de carvão, a ocorrência de perda de massa por atrito ou fragmentação do combustível pode produzir dados falsos para o projeto e, portanto, deve ser quantificada.

Nas pesquisas para o conhecimento dos mecanismos geradores de finos na combustão em leito fluidizado costuma-se separar os efeitos de atrito e da fragmentação ou quebra de partículas.

Segundo La Nauze (1980), Vaux e Keairns (1980) e Flamant e Chraïbi (1989), o atrito pode ser identificado como:

- atrito térmico: produzido por tensões internas associadas a variações bruscas da temperatura da partícula;
- atrito mecânico estático: produzido por pressões externas na superfície da partícula ou por pressões internas associadas à formação de gases, como no processo de devolatilização;
- atrito mecânico cinético: produzido pelo impacto de partículas inertes contra a superfície do combustível. Este tipo de atrito é fortemente influenciado pela velocidade do gás e pela granulometria do material do leito;
- atrito químico: produzido pela reação sólido gás na superfície da partícula, a qual produz finos através de alterações na estrutura da partícula. Pode ser mais significativo para combustíveis friáveis e com alto teor de cinzas.

A taxa global de atrito, determinada pela soma dos diferentes tipos de atrito, ainda sofre a influência da forma e da dureza dos inertes no leito, conforme Prins, Gasteleijn, Draijer e van

Swaaaj (1985) e do tipo de combustível segundo Takeuchi, Neguchi, Hosoda e Hirama (1985) e Vleeskens e Roos (1989).

Enquanto o atrito pode ser entendido como a geração de partículas muito pequenas (semelhantes a grãos de pó) retiradas de um pedaço maior, o fenômeno da fragmentação consiste na quebra de um pedaço de combustível em um número de partes menores do que o original, mas em tamanhos da mesma ordem de grandeza e suficientes para que as partes permaneçam no leito. Segundo Pecanha e Gibbs (1984), a fragmentação dos pedaços de carvão ocorre principalmente no estágio inicial da queima, logo após a sua entrada no leito.

Os fatores que provocam a fragmentação podem ser:

- tensões térmicas devido à variações bruscas de temperaturas, como proposto por Hampartsumian, Fourkashanian e Williams (1989);
- pressões internas causadas pela formação de gases no processo de devolatilização, segundo La Nauze (1980).

A ocorrência de fragmentação ainda é fortemente influenciada pelo tipo de combustível (Prins, Siemons, van Swaaij e Radovanovic-1989) e pela granulometria do combustível alimentado no leito.

Quantificar a geração de finos de carvão por atrito e fragmentação no processo de combustão em leito fluidizado ainda é uma tarefa muito difícil devido à grande variedade de parâmetros envolvidos.

Segundo Park e Lee (1989) para antracito com alto teor de cinzas, os finos elutriados têm sua origem principalmente no processo de alimentação do carvão e não no efeito de atrito de par-

ticulas grandes do carvão.

Chandran e Duqun (1989) reconhecem a importância de geração de finos nos sistemas de alimentação e desenvolvem um modelo para quantificar os finos produzidos por atrito e fragmentação no processo.

Os resultados apresentados por Chakraborty e Howard (1980 e 1981) para partículas esféricas de carbono (3-20 mm de diâmetro) e por Takeuchi, Deguchi, Hosoda e Hirama (1985) para quatro tipos diferentes de carvão mineral, mostram que a perda de massa por atrito em um leito fluidizado é tão pequena que pode ser ignorada em comparação com a perda de massa produzida pela reação de queima.

Os dados de Flamant e Chraïbi (1989) obtidos para partículas de $MnCl_2$ (cloreto de manganês) em um leito fluidizado por ar e amônia, mostram uma taxa de atrito cinético da ordem de 0,5%/hora em relação à massa inicial, enquanto os valores da taxa de atrito cinético por Vleesken e Roos (1989) para coque de diversos carvões minerais variam de 0,12% /h a 5,0%/h da massa inicial. Esses valores costumam a ficar abaixo de 1% das taxas de reação expressas em $g/cm^2 s$.

2.5- Modelagem da Queima em Combustores de Leito Fluidizado Borbulhante.

A modelagem de um processo consiste na sua descrição através de equações baseadas em suposições teóricas relativas ao processo.

Os objetivos de um modelo estão sempre ligados à necessidade de:

- antecipar dados de projeto;
- controle do processo;
- simulações de mudança nas condições de operação do processo, e
- otimização e melhoria da eficiência do processo.

A validade de um modelo é checada pela comparação entre os resultados calculados e os dados reais medidos nas condições de operação.

O desenvolvimento do modelo matemático pode ser realizado a diferentes níveis de detalhamento, dependendo das características, da quantidade e qualidade das informações necessárias sobre o processo.

O desenvolvimento dos modelos para a combustão em leito fluidizado pode ser melhor descrito a partir do relacionamento entre a fluidodinâmica do leito, a presença do combustível queimando dentro do leito, a transferência de calor e a evolução da granulometria dos sólidos.

a) A fluidodinâmica do leito identifica os modelos em relação à existência de fases no processo de fluidização. Os modelos podem não fazer distinção entre bolha e emulsão, como no trabalho de Park, Levenspiel e Fitzgerald (1981); adotar a teoria das duas fases, como Davidson e Harrison (1963), e Avedesian e Davidson (1973) ou ainda, considerar três fases, como proposto inicialmente por Kunii e Levenspiel (1968) e, depois, por Chen e Saxena

(1977) e Saxena, Grewal e Venhatoramana (1978).

A fluidodinâmica fornece elementos que permitem também dar características de escoamento nas diferentes fases, como a troca de gases entre as fases de bolha e de ebulição, a variação da concentração de oxigênio dentro do leito, a recirculação dos sólidos dentro do leito em função do movimento das bolhas, os regimes de bolhas rápidas, ou de bolhas lentas, etc...

b) A presença do combustível queimando dentro do leito envolve a consideração de uma série de fatores, tais como:

- forma do combustível: a maioria dos modelos simplifica o tratamento matemático, considerando as partículas esféricas de combustível;
- estrutura de poros do combustível: a reação pode ser superficial no caso dos sólidos não porosos, queimando com redução homogênea do seu volume, mantendo a densidade constante, ou no caso de sólidos porosos, a partícula pode queimar internamente, mantendo o volume constante e diminuindo a sua densidade;
- devolatilização: a evolução dos voláteis pode ser considerada instantânea, ou com taxa finita, ocorrendo como um processo temporal a ser considerado na modelagem;
- a queima dos voláteis;
- a granulometria e a concentração do combustível no leito;
- as reações químicas da combustão;
- os mecanismos de controle da combustão: cinético, difusional ou ambos;
- as perdas de massa por atrito e elutração, e

- o local da queima: na fase de bolhas, na emulsão ou acima do leito.

c) Transferência de Calor:

Os processos de troca de calor podem ocorrer entre:

- os gases da emulsão e os da fase de bolha;
- os sólidos e os gases do leito com os gases e sólidos acima do leito.
- entre os sólidos no leito e acima do leito;
- os sólidos e os gases com as superfícies imersas dentro do leito e acima do leito.

O conhecimento dos perfis de temperatura dentro do leito e acima dele são necessários para a simulação dos processos de queima porque:

- as taxas de reações químicas dependem fortemente da temperatura;
- a transferência de massa entre as fases e as propriedades físicas dos gases dependem da temperatura;
- a transferência de calor entre o leito e a região acima do leito ("freeboard") e as superfícies imersas são determinadas por diferenças de temperatura.

A inclusão da transferência de calor em um modelo, implica na realização de balanços de energia:

- global para todo o leito;
- diferenciados para a fase de bolhas e emulsão e para a região acima do leito.

d) Granulometria dos sólidos

Quando as partículas são introduzidas no leito fluidizado, elas sofrem uma série de processos simultâneos que irão determinar a distribuição granulométrica dentro do leito.

Esses processos são:

- a redução do tamanho da partícula devido à reações químicas entre os sólidos e o gases. Esta redução também ocorre pela perda de cinzas incluídas no combustível e que são liberadas após a queima da matriz de carbono;
- a redução devido ao atrito cinético entre as partículas e entre as partículas e superfícies internas ao leito;
- redução devido à fragmentações, e
- a retirada de partículas do leito por elutriação.

O conhecimento da distribuição granulométrica dos sólidos dentro do leito é importante para os processos de transferência de massa, troca de calor e para a determinação do regime de fluidização.

O detalhamento dos elementos para a modelagem e simulação expostos acima- bem como comentários sobre o desenvolvimento dos principais modelos, pode ser encontrado nos trabalhos de Olofsson (1980) e Souza Santos (1987).

2.6. Queima de Combustíveis Vegetais em Leito Fluidizado Borbulhante.

Embora recentemente tenha-se assistido a um avanço considerável no entendimento da combustão em leito fluidizado, este progresso esteve quase sempre dirigido para a queima de partículas pequenas (menores que 5 mm) de carvão ou coque, visando em especial a determinação dos produtos primários da reação de queima. Os resultados dessas pesquisas podem ser encontrados em Howard (1983), Basu (1984), La Nauze (1985), Weinberg (1986) e Radovanovic (1986), entre outros.

Relativamente pouco tem sido realizado para esclarecer de maneira detalhada, através de estudos básicos, a queima de combustíveis vegetais em leito fluidizado borbulhante; talvez pela própria diversidade de tipos, disponibilidade e sazonalidade.

2.6.1. Caracterização dos Combustíveis Vegetais.

A biomassa se apresenta na forma física que vai de galhos e troncos até sementes, grama, cascas, resíduos de processos industriais e de colheita.

Sua forma pode ser modificada, picando-se pedaços maiores, como troncos, para cavacos entre 5 e 50 mm, com tamanho mais favorável para a combustão fluidizada. Quando se apresenta como serragem, bagaço, cascas de arroz ou lixo peletizado, o combustível pode ser peletizado, conforme Barton, Poll, Webb e Whalley (1985), para as mesmas dimensões acima citadas.

Ao serem submetidos à pirólise, os combustíveis vegetais perdem cerca de 80% de sua massa na forma de gases, contendo uma grande proporção de água e CO_2 ; cujo poder calorífico é consequentemente baixo. O carvão residual é poroso e muito reativo.

De uma maneira geral os combustíveis vegetais apresentam baixa densidade, alto teor de matéria volátil, estrutura porosa e possuem basicamente a mesma constituição elementar.

A caracterização de alguns tipos de biomassa combustível de interesse para a queima, é apresentada nas tabelas 2.2, 2.3 e 2.4. Os valores relativos aos carvões minerais são incluídos para efeito de comparação.

Tabela 2.2: Análise Elementar de Biomassas e Carvões

Valores em base seca e livres de cinzas (%)					
Combustível	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre
Lixo Peletizado*	52	6,6	40	0,1	0,3
Madeira*	50	6,0	44	0,1	0,1
Turfa*	58	5,5	35	1,0	0,4
C. Betuminoso*	88	5,7	9,2	1,4	1,4
Antracito*	94	3,0	1,5	0,8	0,6
Bagaço Cana**	47	6,5	44	---	---
C. Vegetal*	93	2,5	3,0	1,0	---

* Valores obtidos de Spiers (1955) e Rose e Cooper (1957)

** Valores obtidos de Hugot (1977)

Tabela 2.3: Análise Imediata de Biomassas e de Carvão

Combustível	Umidade relativa (%)	Cinzas [†] (%)	Voláteis [†] (%)	Carbono+fixo (%)
C. Vegetal Eucaliptus*	5	2	25	73
Cavacos de madeira*	30/45	0,3	80	20
Sabugo de milho*	15	1,0	85	14
Serragem*	25	0,3	80	20
Cascas de arroz*	12	11	74	15
Bagaço de cana*	40	3	80	17
Turfa processada**	10	10	60	30
Carvão mineral*	5/10	30/50	10/20	30/60

[†] valores em base seca

* valores de Santos (1981)

** valores adaptados de: Lenz, Ramos (1985) e de Motta, Nakano, Shimada, Nucci, Milko e Coelho (1982)

Tabela 2.4: Comparação em Massa e Volume para a Geração de Energia de Diferentes Combustíveis.

Combustível	Densidade (kg/m ³)	P.C.S (kcal/kg)	Comparação para a mesma quantidade de energia	
			em volume	em massa
C. Vegetal de Eucaliptus*	400/500	7500	1,0	1,0
Cavacos de madeira*	300	4300	2,7	1,7
Sabugo de milho*	190	4800	3,9	1,5
Serragem*	160	4500	5,0	1,7
Cascas de arroz*	150	4800	5,0	1,7
Bagaço de cana*	80	4500	8,8	1,6
Turfa processada**	140	4200	5,7	1,8
Carvão mineral*	1100	4250	0,7	1,8

* valores de Santos (1981)

** valores adaptados de: Lenz e Ramos (1985) e Motta, Nakano, Shimada, Nucci, Milko e Coelho (1982)

2.6.2- Influencia das Propriedades dos Combustíveis Vegetais nas Condições de Operação de um Queimador de Leito Fluidizado Borbulhante.

a- Tamanho das Partículas

O tamanho das partículas de combustíveis vegetais para queima em leito fluidizado pode variar de serragem e cascas de arroz com 2 a 4 mm (Gulyurtlu e Cabrita, 1984 e Cooke 1984) cavacos de madeira com 25 a 50 mm (Lestani, Sayão, Silberman e Ferreira 1985), até sabugos de milho com cerca de 100 mm (Santos 1981).

A interação das partículas grandes de combustível vegetal com o leito de inertes é tal que o movimento das bolhas nem sempre as confina à fase densa, fazendo com que apresentem frequentemente contato com a fase de bolhas e com a região de "splash", onde irão reagir com o oxigênio de maneira diferente daquela descrita por Avedesian e Davidson (1973) para partículas pequenas de carvão mineral.

Para condições típicas de operação de um combustor de leito fluidizado, o uso de partículas grandes de combustível vegetal no leito, desprezando-se a difusão de oxigênio no interior do combustível (conforme definida por Walker, Kusinko e Austin, 1959, e Mulcahy e Smith 1969) e para uma mesma faixa de geração de energia, irá provocar um aumento na concentração de massa do combustível no leito. As variações de temperatura do leito em função da variação da alimentação de combustível, serão mais lentas para combustíveis com maior granulometria.

b- Densidade

Os combustíveis vegetais tem densidade menor do que a dos carvões minerais (Tabela 2.4) ou a dos materiais que podem constituir o leito de inertes, como areia, alumina, cinzas e outros.

A qualidade da mistura e da circulação de combustível dentro do leito é fortemente dependente da densidade e pode determinar ou não a adequação do combustível para a combustão fluidizada.

Os resultados obtidos por Santos (1981) mostram que mesmo a associação de tamanho grande com baixa densidade, como no caso de sabugos de milho, ainda pode apresentar boa queima e recirculação dentro do leito. Isso poderia ser explicado por um mecanismo de mistura, descrito por Nienow e Chiba (1985), quando o leito é predominantemente "jetsam" (areia ou alumina), com pouco material "flotsam" (combustível vegetal); no trabalho também é mostrado o efeito do aumento da razão U/U_{mf} na melhora da circulação do componente "flotsam" dentro do leito.

No entanto, a combinação de baixa densidade e tamanho pequeno, como no caso da serragem, pode trazer problemas de elutriação mesmo para velocidades inferiores à necessária para produzir boa mistura.

Estudos realizados por Massom, Rios, Dang, Tran e Bourtembourg (1988) detalham a relação entre a qualidade de mistura para esferas e cilindros, de diferentes tamanhos e densidades, para um regime de fluidização com $U/U_{mf}=2,8$.

Massom (1986) analisa a relação entre a densidade do combustível e a densidade do leito e descreve a maneira como "pellets" de biomassa, que sofrem segregação ao topo de um leito de areia,

podem apresentar boa mistura e boa recirculação em um leito de argila porosa, que possui densidade menor do que a da areia.

c- Matéria Volátil

Os combustíveis de biomassa e também os carvões minerais possuem um componente volátil, constituído basicamente de hidrocarbonetos que são liberados como gases quando submetidos a um aumento de temperatura acima de 200°C. Esta volatilização parcial do combustível é muito diferente da que caracteriza um combustível líquido.

Os voláteis são liberados dos combustíveis não por efeito de uma mudança de fase em função da temperatura, mas como consequência de uma reação química e se a temperatura for diminuída abaixo da de vaporização os gases não se recondensam de forma a reconstituir a substância original do combustível (Spalding-1979).

A devolatilização do combustível dentro do leito é um parâmetro importante para a eficiência do projeto de um queimador de leito fluidizado. No entanto, não existe consenso entre os pesquisadores sobre o mecanismo da evolução e queima dos voláteis (Stubington, 1980; Pillai, 1981; La Nauze, 1982; Agarwal, Genetti e Lee, 1984).

Nos combustíveis vegetais a matéria volátil representa cerca de 75 a 85 % da massa e cerca de 50 a 60 % do conteúdo energético. Torna-se, portanto, relevante conhecer os mecanismos que determinam sua evolução e queima dentro do leito.

Quando o combustível é introduzido no leito, passa pelos processos de secagem, devolatilização, ignição e queima dos volá-

teis, e ignição e queima do carbono fixo.

Poucos trabalhos apresentam resultados de estudos sobre as características e propriedades dos voláteis produzidos pela queima ou pirólise de biomassa em leito fluidizado (Gulyurtlu e Cabrita, 1984; Andre, Gulyurtlu, Jones e Cabrita, 1989). São mencionadas nos estudos medidas para CO_2 , CO , H_2 e CH_4 , mas não são apresentados os valores de concentração.

Mesmo para estudos da queima de carvão mineral, há pouca literatura sobre as características dos voláteis produzidos. Nos trabalhos sobre o assunto é importante citar: Stubington (1980), Stubington e Sumarino (1984) para componentes dos voláteis produzidos (CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , C_2H_4 , $\text{C}_2\text{H}_6...$), Agarwal, Genetti e Lee (1984) para parâmetros cinéticos da evolução de CO e CH_4 e Frins, Siemons, van Swaaij e Radovanovic (1989) para a temperatura de ignição dos voláteis.

O tempo de evolução dos voláteis é um parâmetro importante para o projeto de queima ou gaseificação em leito fluidizado. Embora o tempo de devolatilização seja muito menor do que o tempo para a queima ou gaseificação completa da parte sólida do combustível, para partículas grandes de combustível, ele pode ser muito maior do que o tempo característico de recirculação do combustível dentro do leito. Se 50 a 60 % da energia gerada pela queima da biomassa vem da parte volátil, estequiometricamente ela necessita da mesma proporção do oxigênio consumido na queima total do combustível. Há a necessidade de se saber onde esses gases vão queimar, já que eles concorrem com o carvão sólido pelo mesmo oxigênio fornecido pelo gás de fluidização.

Tan e Stott (1989) analisaram a influência da concentração de O_2 , da temperatura do gás e do tamanho de partícula sobre o tempo de devolatilização e sobre os produtos formados na pirólise da madeira. Salam, Shem e Gibbs (1988) apresentam tempos de devolatilização de até 100s para partículas de carvão mineral de 3 a 13 mm, analisando a influência da concentração de O_2 sobre as taxas de devolatilização. Pillai (1981), Stubington (1980), Stubington e Sumariono (1984), Agarwal, Genetti e Lee (1984) concordam com a necessidade de se considerar a evolução dos voláteis como um processo que ocorre ao longo do tempo e, portanto relevante para o projeto.

Os mecanismos que controlam as taxas de devolatilização não são bem conhecidos. Os estudos realizados mostram que o controle da evolução dos voláteis pode ser:

- Transferência de calor; Agarwall, Genetti e Lee, 1984; Stubington e Sumariono, 1984; André, Gulyurtlu, Jones e Cabrita, 1989; Prins, Siemons, van Swaaij e Radovanovic, 1989; Franco, Gulyurtlu e Cabrita, 1989; Roateng, Malawender e Fan, 1989; Willdegger-Gaissmaier e Agarwall, 1990.

- Difusão dos voláteis através da massa do combustível; La Nauze (1982)

- Mais de um mecanismo; Pillai (1981); Pillai (1985); Salam, Shem e Gibbs (1988); Tan e Stott (1989)

Capítulo 3- Estudo da Distribuição de Massa Dentro de um Leito Fluidizado Borbulhante.

No estudo da combustão fluidizada, a teoria proposta por Avedesian e Davidson (1973), supõe que as partículas de combustível (menores do que 3 mm) permanecem dentro da fase densa (ou de emulsão) do leito e que o oxigênio chega até a superfície do combustível através do processo de difusão da fase de bolhas para a fase densa e daí para a superfície da partícula queimando.

Sabe-se, no entanto, conforme Botterill, Butt, Coin, Chandrasekhar e Williams (1967), Syromyatnikov, Kulikov e Korolev (1977) e Rowe e Masson (1981), que corpos móveis ou fixos dentro de um leito fluidizado apresentam a tendência de atrair ou de formar bolhas. Este fato mais as evidências experimentais encontradas por Santos (1981), corroboram a idéia de que os pedaços de combustível podem gastar parte significativa de seu tempo de residência dentro do leito, em contato com a fase de bolhas. Esta situação pode modificar o mecanismo usualmente admitido de transferência de O_2 , pois quando a partícula se encontra dentro da bolha elimina-se uma etapa no processo de difusão.

Foram realizados testes de fluidização (à temperatura ambiente) para o esclarecimento da interação entre a amostra de combustível vegetal com as fases de emulsão e de bolhas no leito fluidizado.

3.1- Dispositivo Experimental e Operação

Foram construídos dois modelos de leito bidimensional para testes de visualização a frio da distribuição das amostras de combustível durante o processo de fluidização. O primeiro leito bidimensional, mostrado na Figura 3.1, constitui um sistema que permite visualizar o processo de fluidização em um plano frontal pela diminuição da dimensão profundidade. No experimento as dimensões foram: 150 cm de altura, 40 cm de largura e entre 8 e 10 cm de profundidade.

A admissão do ar necessário à fluidização foi realizada pela base do leito, através de uma placa plana perfurada com furos de 1 mm de diâmetro e passo de 2 mm. A observação do experimento foi feita através de uma placa de vidro frontal.

Foi construído também um segundo leito bidimensional com paredes em chapa de alumínio (espessura de 1 mm) para testes com raios-X, tendo dimensões de 40x25x8 cm, e uma placa distribuidora de ar com o mesmo padrão de furos do leito anterior. Para evitar a presença de pó no ambiente da sala de raio-X este leito foi fluidizado com o auxílio de um aspirador de pó ligado ao topo do leito, com a admissão do ar ocorrendo pela base.

Nos testes foram utilizados uma máquina fotográfica de 35 mm, uma filmadora Super-8 e o equipamento de raio-X do Hospital das Clínicas da UNICAMP.

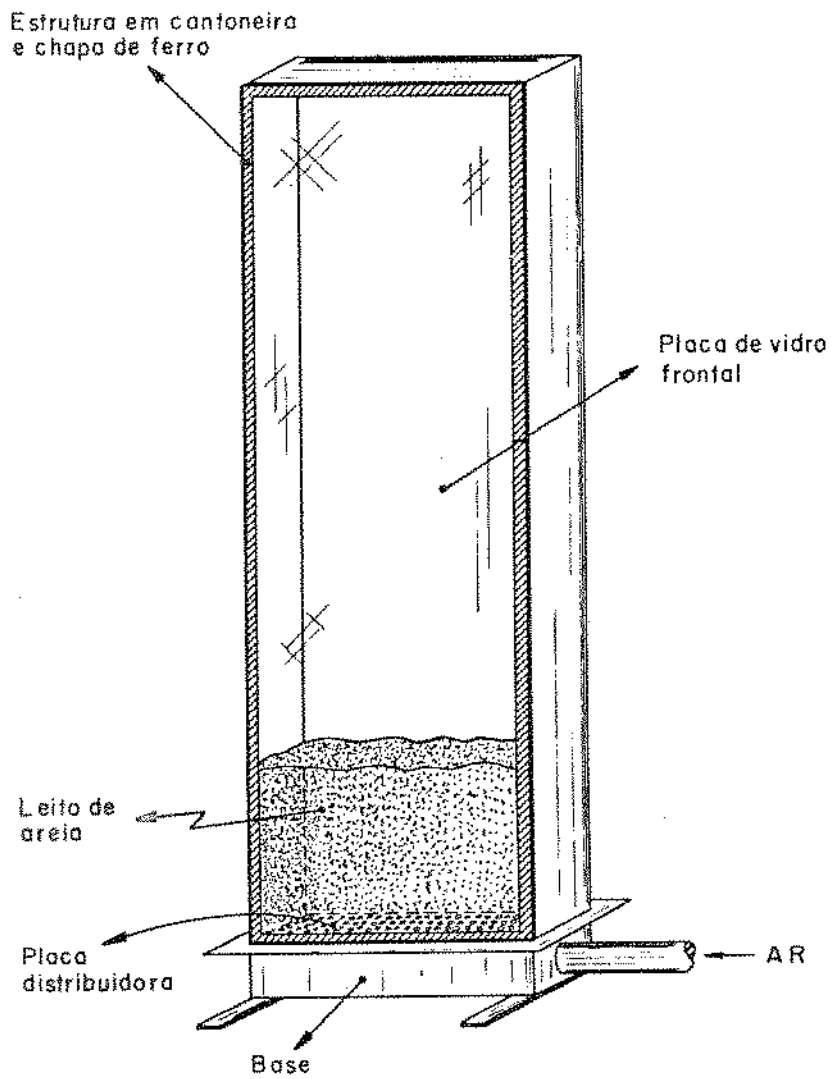


Figura 3.1 : Leito Bidimensional.

As amostras de combustível foram simuladas por blocos cilíndricos de madeira com dois diâmetros ϕ de 2,3 e 3,2 cm, e com comprimentos de 2,0; 4,0; 7,5; e 8,0 cm. Para as amostras de maior diâmetro o comprimento foi diminuído de 8,0 para 7,5 cm para evitar restrições à sua liberdade de movimento dentro do leito.

Foram usados três tipos de madeira com densidades de 0,80; 0,55 e 0,33 g/cm³.

Utilizou-se como material do leito areia de granulometrias $0,42 < d_p < 0,59$ mm e $0,25 < d_p < 0,84$ mm e esferas de vidro com diâmetro de 1mm. O primeiro leito foi fluidizado com o auxílio de um ventilador centrífugo de dois estágios equipado com medidores de vazão e válvula para controle. Foram realizados testes com velocidade superficial do ar U de valores 0,5 ; 0,9 m/s e 1,3 m/s.

Variando-se o número de blocos cilíndricos menores entre 5 e 40, e entre 3 e 10 para os blocos maiores, foi possível simular condições de mesma massa ou de mesmo volume de amostras de combustível dentro do leito para diferentes condições de tamanho, densidade e quantidade de amostras dentro do leito.

Os testes para estudar a distribuição do combustível dentro do leito foram realizados levando em conta:

- o tamanho da amostra de combustível;
- o número de amostras;
- a concentração de massa (efeito de população);
- a densidade do combustível;
- a velocidade de fluidização e
- a granulometria do material do leito.

Durante todos os testes realizados procurou-se manter a mesma altura do leito (30 cm), medida em repouso.

A documentação dos testes foi realizada com o uso de fotos (cerca de 3000) ou de filmes Super 8 e, alguns testes, com chapas de raios-X.

3.2- Apresentação dos Resultados

Admitiu-se que o intervalo de tempo que as amostras de combustível passam fora da fase densa, está em relação direta com a porcentagem (%) de amostras de combustível registradas fora da mesma.

Nos resultados calculados a partir das fotos esta porcentagem foi obtida de:

$$(\%) = \left(\sum_{i=1}^N X_i / X_T \cdot N \right) \times 100\% \quad (3.1)$$

onde:

X_i = número de amostras fora da emulsão, na i ésima foto;

X_T = número total de amostras no leite e

N = número de fotos.

Para evitar que o método utilizado para registro dos eventos pudesse modificar os resultados numéricos, considerou-se nos resultados com filme Super 8, que o tempo fora da emulsão é dado pela razão do número de ocorrências fora da emulsão pelo tempo de projeção e pelo número de amostras dentro do leite.

Para os registros com chapas de raios-X, o método para calcular foi o mesmo utilizado para fotos. Os resultados com as chapas de raios-X, no entanto, apresentaram o inconveniente de que a trans-

parência do leito mostrada nas chapas, não permitiu discernir se uma amostra estava localizada dentro da bolha ou atrás da bolha. Por essa razão esses resultados não foram utilizados nesse trabalho.

Os resultados obtidos com filme Super 8 são mostrados na Tabela 3.1, para leito de areia com $0,25 < d_p < 0,84$ mm. As Tabelas 3.2 a 3.6, apresentam os resultados obtidos com fotos para leito constituído de areia com $0,42 < d_p < 0,59$ mm. Os resultados obtidos em leito de esferas de vidro estão apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.1- Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão (Filme Super 8)

Amostras de Combustível: Cilindros de Madeira com $\phi = 2,3$ cm e $\rho = 0,55$ g/cm ³					
Leito de Areia: $0,25 < d_p < 0,84$ mm			$U_{mf} = 0,25$ m/s		
Nº de Amostras	10	10	20	20	20
Comprimento (cm)	8,0	8,0	8,0	4,0	4,0
U (m/s)	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5
Ocorrências nº amostras x tempo(1/min)	0,9	1,8	1,4	0,87	0,24

Examinando-se os resultados obtidos com filme Super 8, verifica-se que a ocorrência de amostras de combustível fora da emulsão aumenta com o tamanho da amostra.

Para uma mesma massa de combustível e mesma velocidade de fluidização, este efeito é maior para menores valores da razão U/U_{mf} . Assim, por exemplo, 20 amostras cilíndricas de $4,0 \times 2,3$ cm representam dentro do leito a mesma concentração de massa que 10 amostras de $8,0 \times 2,3$ cm. Pode-se observar que as 20 amostras de $4,0 \times 2,3$ cm e as 10 amostras de $8,0 \times 2,3$ cm apresentam respectiva-

mente 0,24 e 0,9 ocorrências por minuto por número de amostras para uma mesma velocidade de fluidização de 0,5 m/s, ($U/U_{mf}=2$).

Quando se muda a velocidade do ar para 1m/s ($U/U_{mf}=4$), obtém-se 0,87 e 1,8 ocorrências por minuto por número de amostras, representando um aumento de 2,1 vezes na porcentagem de amostras fora da emulsão, comparada com um aumento de 3,8 vezes para $U=0,5$ m/s.

Os resultados relativos ao efeito de população sobre a ocorrência de amostras fora da emulsão (segunda e terceira coluna da Tabela 3.1), mostram uma pequena diminuição de 1,8 para 1.4 ocorrências por minuto por número de amostras, em função do aumento de 10 para 20 amostras de $8,0 \times 2,3$ cm no leito.

Os resultados das Tabelas 3.2 a 3.5 mostram a porcentagem de ocorrências das amostras fora da emulsão em função da velocidade de fluidização, do tamanho de amostra, da densidade da amostra e do número de amostras dentro do leito. Devido à preparação das amostras em tamanhos convenientes foi sempre possível obter, para cada densidade de amostras, as mesmas concentrações de massa no leito.

Tabela 3.2- Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão

Amostra de Combustível: Cilindros de Madeira, $\phi = 2,3$ cm e $\rho = 0,33$ g/cm ³										
Leito de Areia: $0,42 < d_p < 0,59$ mm $U_{mf} = 0,3$ m/s										
Região de Bolhas										
U (m/s)	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3
Comprimento (cm)	2,0									
Nº de Amostras	5		10		20		30		40	
Nº de Ocorrências (%)	0,0	3,3	0,6	2,0	0,0	1,3	0,0	2,9	1,0	0,6
Comprimento (cm)	4,0									
Nº de Amostras	3		5		10		15		20	
Nº de Ocorrências (%)	5,3	4,4	2,0	1,0	6,1	4,3	1,1	3,0	3,8	3,6
Comprimento (cm)	8,0									
Nº de Amostras	-		3		5		8		10	
Nº de Ocorrências (%)	-	-	1,7	0,0	2,2	3,0	4,7	4,9	2,5	3,0
Região de "Splash"										
U (m/s)	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3
Comprimento (cm)	2,0									
Nº de Amostras	5		10		20		30		40	
Nº de Ocorrências (%)	2,9	6,7	7,2	8,0	8,8	2,5	8,0	1,9	6,3	6,1
Comprimento (cm)	4,0									
Nº de Amostras	3		5		10		15		20	
Nº de Ocorrências (%)	7,0	4,4	7,0	5,0	8,3	5,7	8,9	4,4	6,8	4,5
Comprimento (cm)	8,0									
Nº de Amostras	-		3		5		8		10	
Nº de Ocorrências (%)	-	-	10,0	16,0	12,2	4,0	9,4	6,6	10,0	9,0

Tabela 3.3- Ocorrência de amostras Fora da Emulsão

Amostra de Combustível: Cilindros de Madeira, $\phi = 2,3$ cm e										
$\rho = 0,80$ g/cm ³										
Leito de Areia: $0,42 < d_p < 0,59$ mm $U_{mf} = 0,3$ m/s										
Região de Bolhas										
U (m/s)	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3
Comprimento (cm)	2,0									
Nº de Amostras	5	10		20		30		40		
Nº de Ocorrências (%)	1,0	1,0	0,5	1,1	0,0	0,0	0,0	0,4	0,1	0,0
Comprimento (cm)	4,0									
Nº de Amostras	3	5		10		15		20		
Nº de Ocorrências (%)	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	1,1	1,3	1,3	0,3	0,3
Comprimento (cm)	7,5									
Nº de Amostras	-	3		5		-		10		
Nº de Ocorrências (%)	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	0,0	1,1
Região de "Splash"										
U (m/s)	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3
Comprimento (cm)	2,0									
Nº de Amostras	5	10		20		30		40		
Nº de Ocorrências (%)	1,0	2,7	2,0	1,7	2,1	2,0	2,0	2,3	2,0	2,4
Comprimento (cm)	4,0									
Nº de Amostras	3	5		10		15		20		
Nº de Ocorrências (%)	2,2	5,6	5,3	1,0	1,5	2,2	2,3	2,0	3,6	1,6
Comprimento (cm)	7,5									
Nº de Amostras	-	3		5		-		10		
Nº de Ocorrências (%)	-	-	5,6	7,1	4,0	4,4	-	-	2,2	0,0

Tabela 3.4- Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão

Amostra de Combustível: Cilindros de Madeira, $\phi = 3,2$ cm e $\rho = 0,55$ g/cm³

Leito de Areia: $0,42 < d_p < 0,59$ mm $U_{mf} = 0,3$ m/s

Região de Bolhas

U (m/s) 0,9 1,3 0,9 1,3 0,9 1,3 0,9 1,3 0,9 1,3

Comprimento (cm) 2,0

Nº de Amostras 5 10 20 30 40

Nº de Ocorrências (%) 0,0 0,0 0,7 0,0 0,5 0,4 0,2 0,3 0,0 0,1

Comprimento (cm) 4,0

Nº de Amostras 3 5 10 15 20

Nº de Ocorrências (%) 1,8 0,0 1,0 0,0 1,8 1,6 2,3 3,6 2,2 1,5

Comprimento (cm) 7,5

Nº de Amostras - 3 5 - 10

Nº de Ocorrências (%) - - 0,0 0,0 1,1 1,1 - - 1,4 3,5

Região de "Splash"

U (m/s) 0,9 1,3 0,9 1,3 0,9 1,3 0,9 1,3 0,9 1,3

Comprimento (cm) 2,0

Nº de Amostras 5 10 20 30 40

Nº de Ocorrências (%) 1,3 6,3 2,1 3,8 4,4 3,7 5,5 2,1 6,3 4,0

Comprimentos (cm) 4,0

Nº de Amostras 3 5 10 15 20

Nº de Ocorrências (%) 5,3 3,5 7,0 5,3 4,3 6,0 5,9 3,1 11,1 6,0

Comprimentos (cm) 7,5

Nº de Amostras - 3 5 - 10

Nº de Ocorrências (%) - - 10,5 3,5 12,6 12,6 - - 6,7 6,0

Tabela 3.5- Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão

Amostras de Combustível: Cilindros de Madeira, $\phi=3,2$ cm e $\rho=0,80$ g/cm ³											
Leito de Areia: $0,42 < d_p < 0,59$ mm						$U_{mf}= 0,3$ m/s					
Região de Bolhas											
U (m/s)	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	
Comprimento (cm)	2,0										
Nº de Amostras	5		10		20		30		40		
Nº de Ocorrências (%)	0,0	-	0,0	-	0,6	1,4	0,0	1,8	0,3	0,3	
Comprimento (cm)	4,0										
Nº de Amostras	3		5		10		15		20		
Nº de Ocorrências (%)	0,0	0,0	3,3	0,0	4,4	3,0	1,3	2,5	1,7	1,1	
Comprimento (cm)	7,5										
Nº de Amostras	-		3		5		-		10		
Nº de Ocorrências (%)	-	-	0,0	6,7	2,0	0,0	-	-	0,5	1,6	
Região de "Splash"											
U (m/s)	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	
Comprimento (cm)	2,0										
Nº de Amostras	5		10		20		30		40		
Nº de Ocorrências (%)	1,3	-	3,8	-	3,6	2,2	3,8	2,5	5,6	2,5	
Comprimento (cm)	4,0										
Nº de Amostras	3		5		10		15		20		
Nº de Ocorrências (%)	2,4	2,2	4,4	2,9	5,0	3,0	5,0	3,9	4,1	5,0	
Comprimento (cm)	7,5										
Nº de Amostras	-		3		5		-		10		
Nº de Ocorrências (%)	-	-	9,8	1,7	5,0	4,8	-	-	6,0	4,2	

A análise das Tabelas 3.2 a 3.5, mostra que a ocorrência de amostras fora da emulsão se dá principalmente na região de "splash".

As Figuras 3.2 a 3.7 mostram a porcentagem de ocorrências de amostras de combustível fora da emulsão (nas regiões de bolha e de "splash") em função do número de amostras de combustível dentro do leito. Analisando-se os valores graficados, verifica-se que o registro fotográfico dos eventos não mostra um efeito significativo da população na porcentagem de ocorrências de amostras fora da emulsão:

Observa-se que, para os vários tipos de amostras, praticamente em todos os testes com $U=0,9$ m/s há na média uma maior ocorrência de amostras fora da emulsão do que nos testes com $U=1,3$ m/s.

Verifica-se, por outro lado, que para as condições de mesmo tamanho de amostra e mesma velocidade de fluidização as amostras de menor densidade apresentam maior porcentagem de ocorrências fora da emulsão.

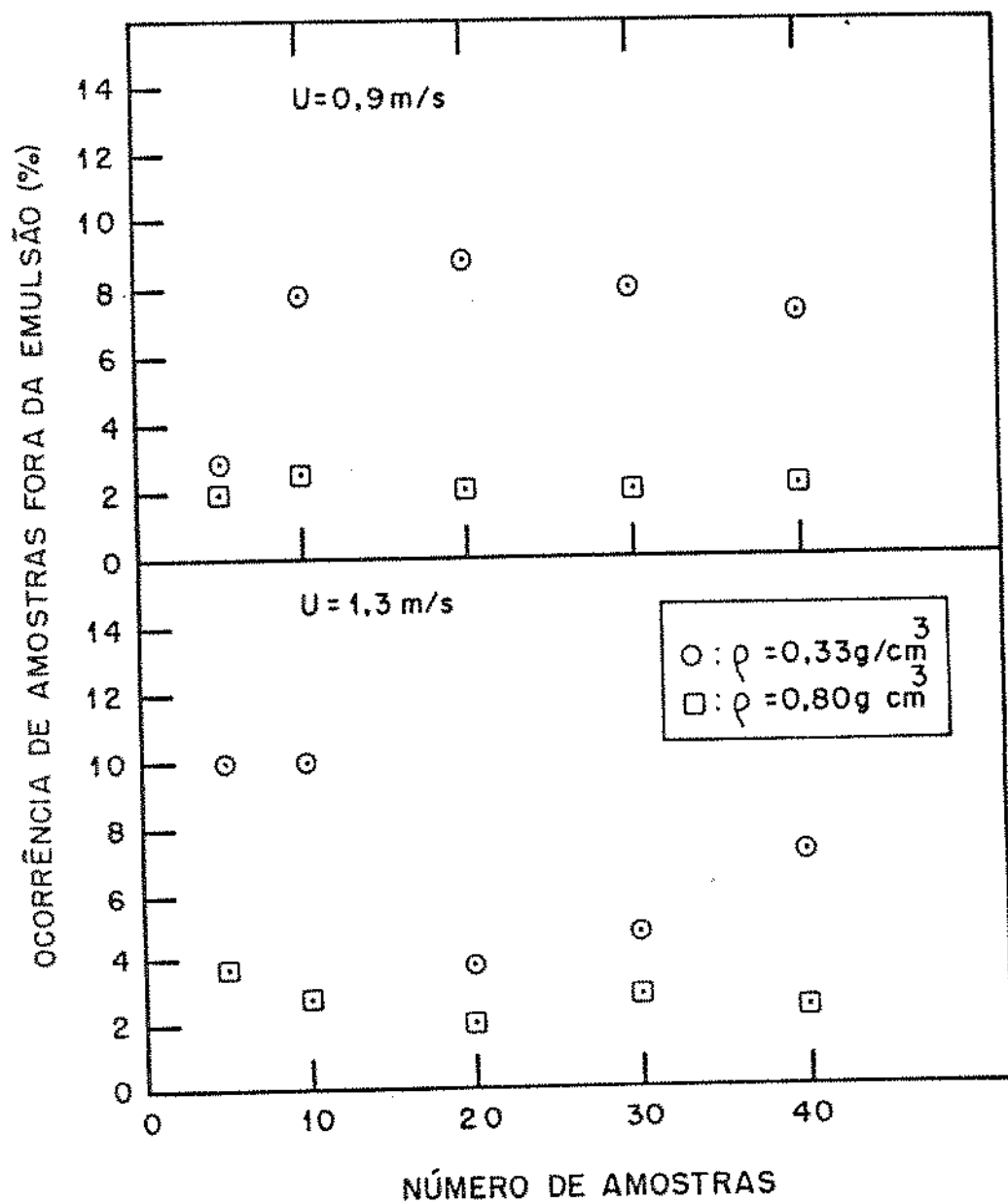


Figura 3.2: Ocorrência de Amostra Fora da Emulsão em Função do Número de Amostras de Combustível no Leito - Amostras de 2,0 x 2,3 cm.

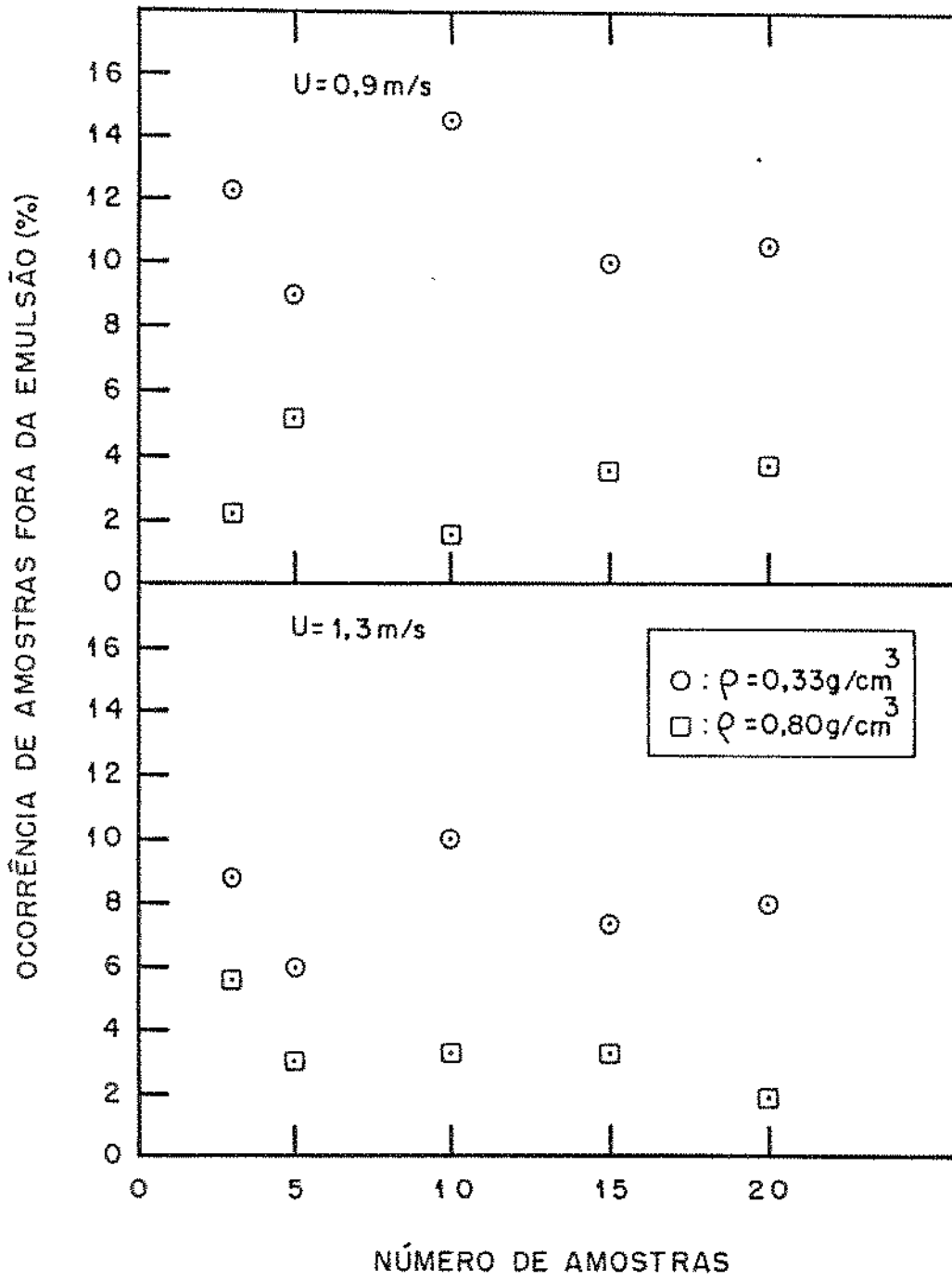


Figura 3.3: Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão em Função do Número de Amostras de Combustível no Leito - Amostras de 4,0 x 2,3 cm.

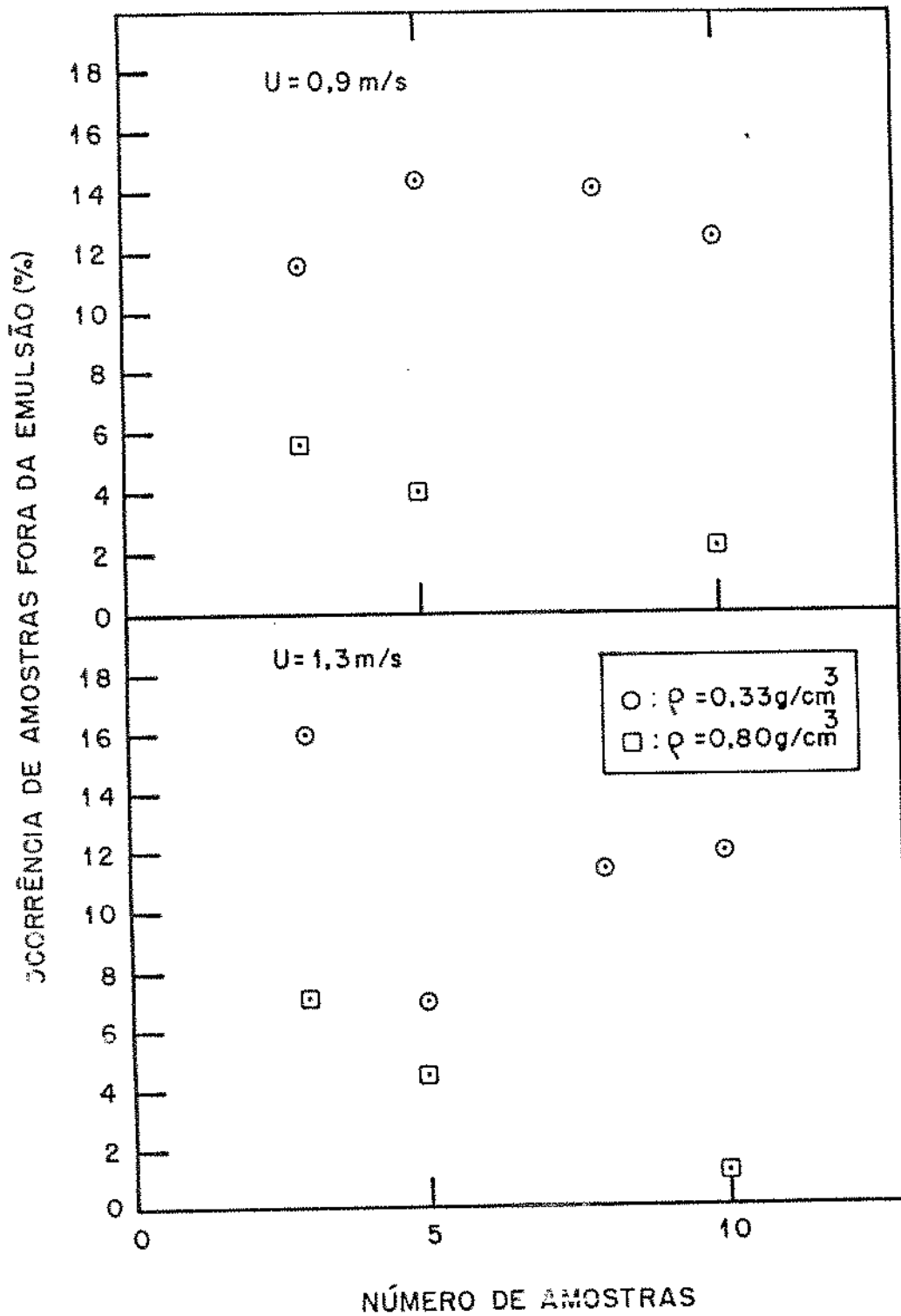


Figura 3.4: Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão em Função do Número de Amostras de Combustível no Leito - Amostras de 7,5 x 2,9 cm.

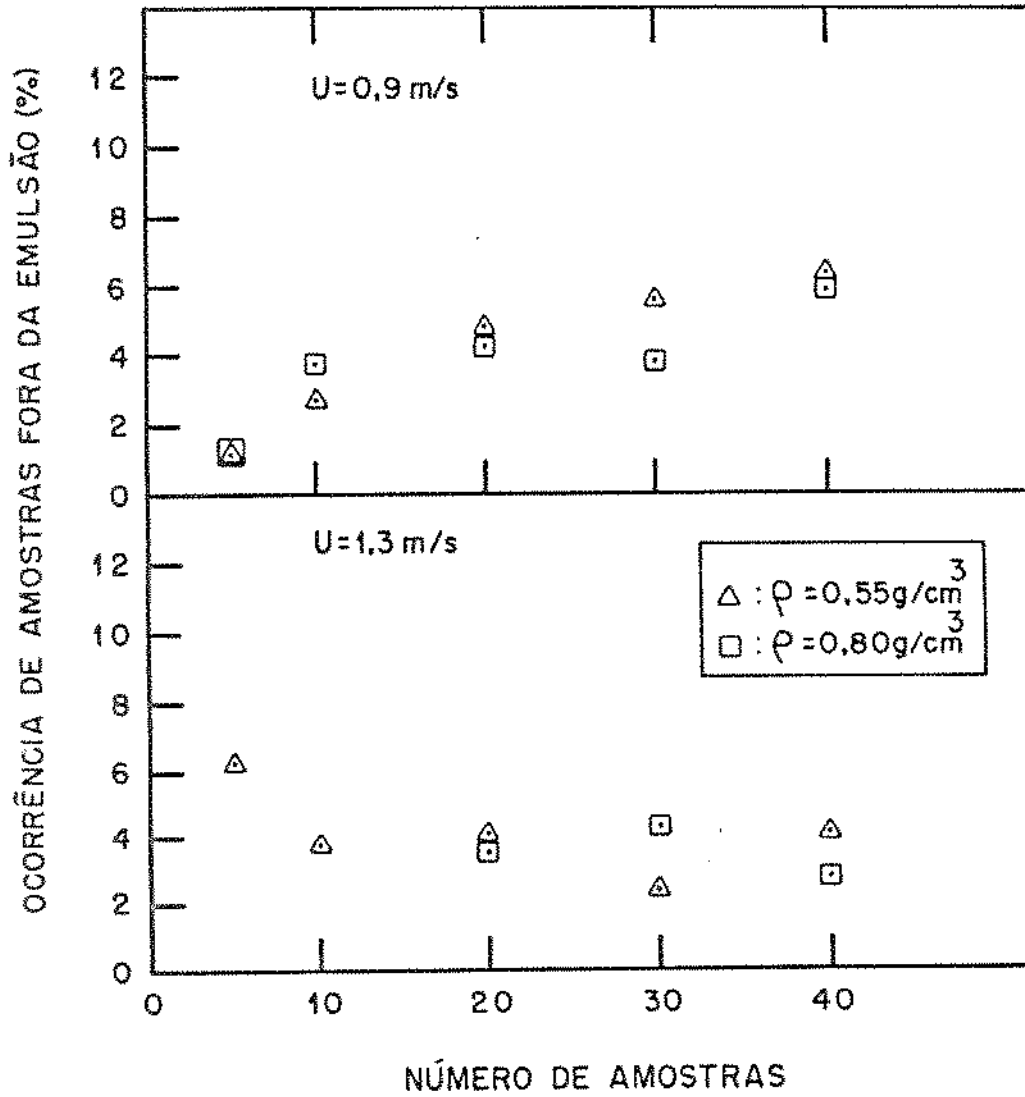


Figura 3.5: Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão em Função do Número de Amostras de Combustível no Leito - Amostras de 2,0 x 3,2 cm.

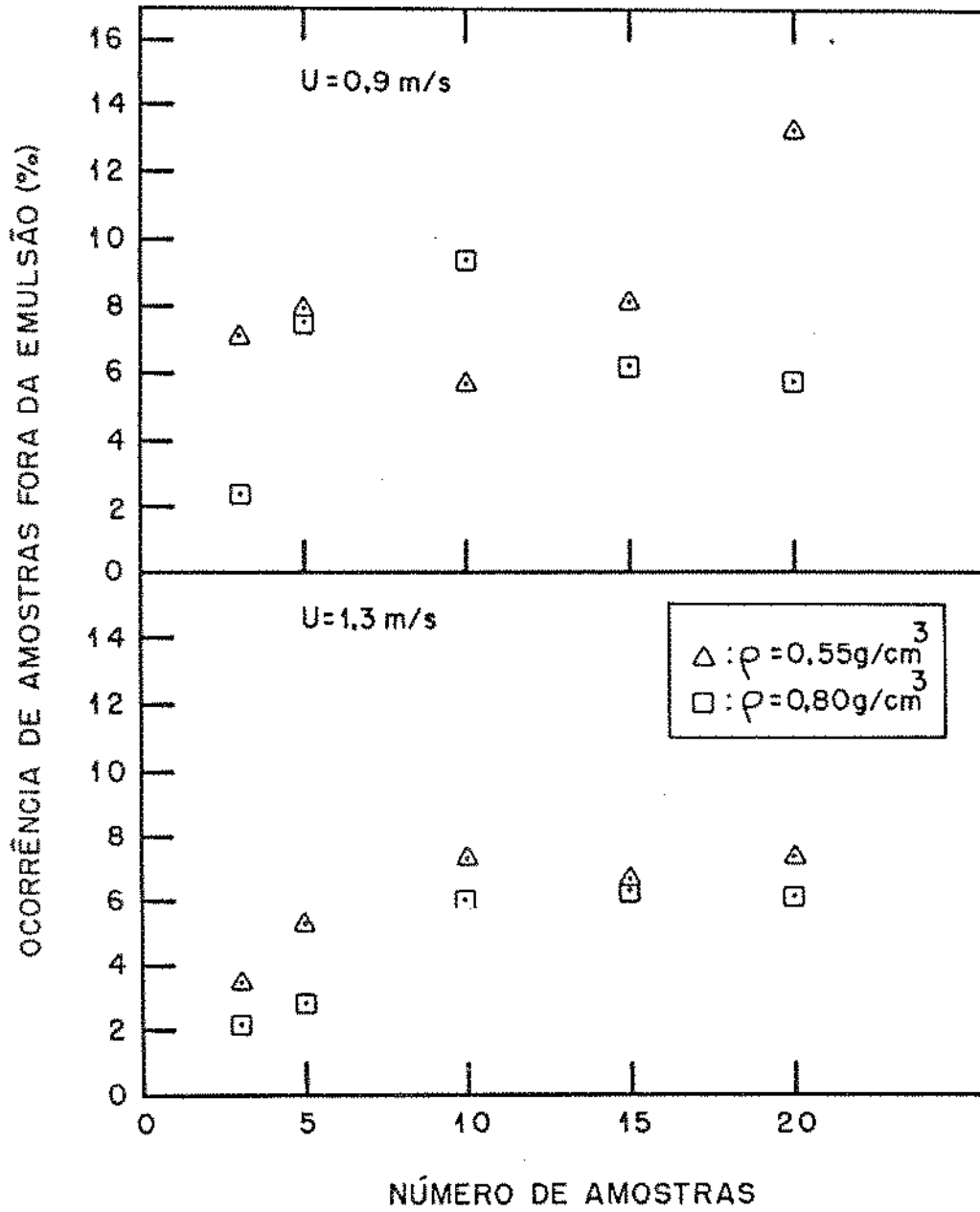


Figura 3.6: Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão em Função do Número de Amostras de Combustível no Leito - Amostras de 4,0 x 3,2 cm.

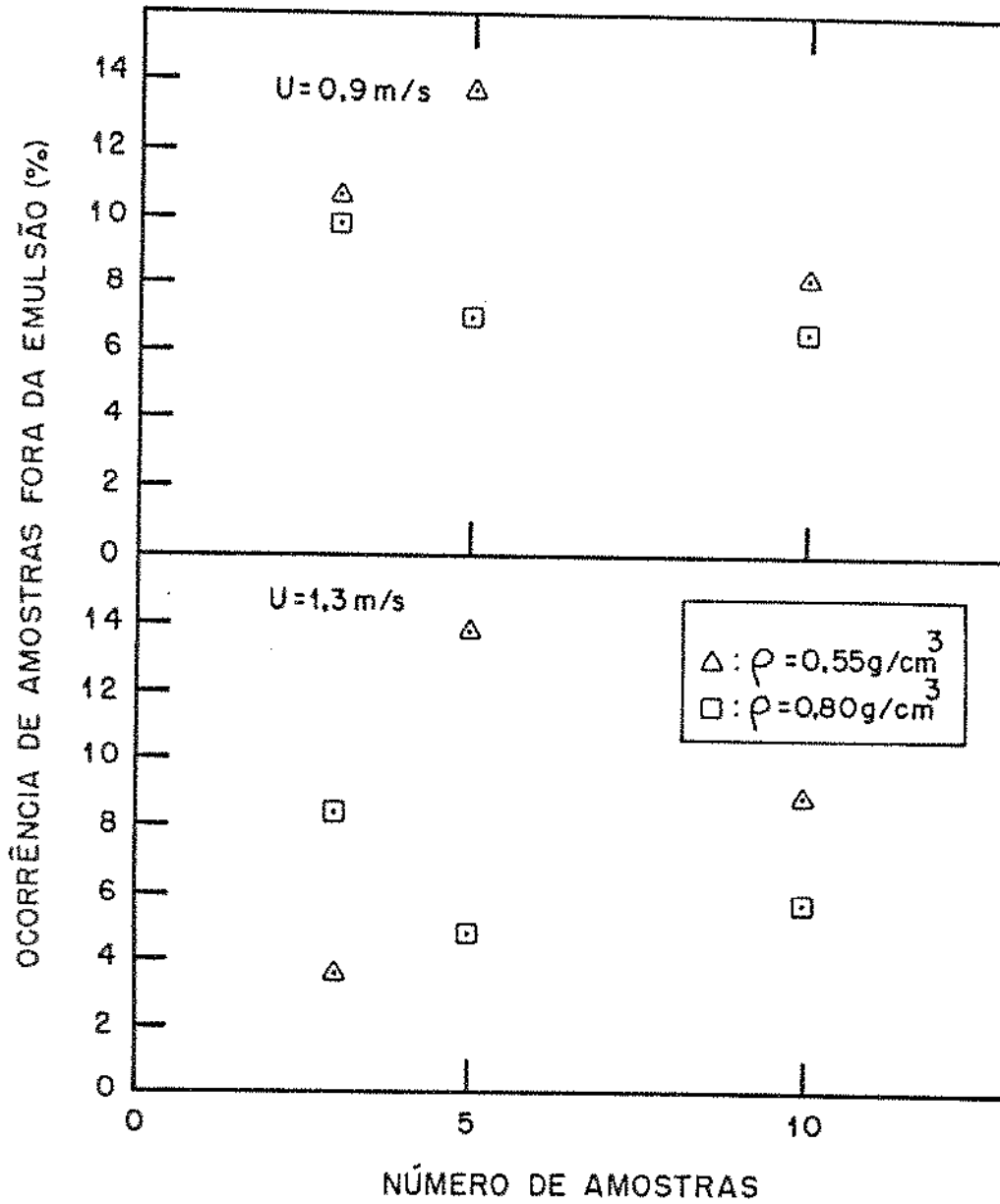


Figura 3.7: Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão em Função do Número de Amostras de Combustível no Leito - Amostras de 7,5 x 3,2 cm.

A não observância do efeito de população sobre a ocorrência de amostras fora da emulsão, sugere que se calcule o valor médio das ocorrências fora da emulsão a partir dos valores obtidos quando se variou o número de amostras no leite. Os resultados obtidos estão mostrados nas Tabelas 3.6 a 3.9.

Tabela 3.6: Média de Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão

Amostra de Combustível: Cilindros de Madeira $\phi = 2,3$ cm e
 $\rho = 0,33$ g/cm³

Leito de Areia	: 0,42 < d _p < 0,59 mm	
U (m/s)	: 0,9	1,3
Comprimento (cm)	: 2,0	
Média (%)	: 7,0	7,1
Comprimento (cm)	: 4,0	
Média (%)	: 11,3	8,1
Comprimento (cm)	: 8,0	
Média (%)	: 13,2	11,6

Tabela 3.7: Média da Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão

Amostra de Combustível: Cilindros de Madeira: $\phi = 3,2$ cm e
 $\rho = 0,55$ g/cm³

Leito de Areia	: 0,42 < d _p < 0,59 mm	
U (m/s)	: 0,9	1,3
Comprimento (cm)	: 2,0	
Média (%)	: 4,2	4,1
Comprimento (cm)	: 4,0	
Média (%)	: 8,5	8,1
Comprimento (cm)	: 7,5	
Média (%)	: 10,8	8,7

Tabela 3.8: Média da Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão

Amostra de Combustível: Cilindros de Madeira: $\phi = 3,2$ cm e $\rho = 0,80$ g/cm ³		
Leito de Areia	: $0,42 < d_p < 0,59$ mm	
U (m/s)	: 0,9	1,3
Comprimento (cm)	:	2,0
Média (%)	: 3,8	3,6
Comprimento (cm)	:	4,0
Média (%)	: 6,3	4,7
Comprimento (cm)	:	7,5
Média (%)	: 7,8	6,3

Tabela 3.9: Média da Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão

Amostra de Combustível: Cilindros de Madeira: $\phi = 2,3$ cm e $\rho = 0,80$ g/cm ³		
Leito de Areia	: $0,42 < d_p < 0,55$ mm	
U (m/s)	: 0,9	1,3
Comprimento (cm)	:	2,0
Média (%)	: 2,1	2,7
Comprimento (cm)	:	4,0
Média (%)	: 3,3	3,4
Comprimento (cm)	:	7,5
Média (%)	: 3,9	4,2

O exame das tabelas mostra claramente que, para os três valores de densidade das amostras utilizadas, o número de ocorrências fora da emulsão aumenta com o comprimento e o diâmetro das amostras. Esse resultado é coerente com os da Tabela 3.1, ob-

tidos com o uso de filme Super 8.

A análise da Tabela 3.10 mostra que, para um leito constituído de esferas de vidro, mantém-se o fenómeno da ocorrência de amostras fora da emulsão, já observado com leito de areia. Verifica-se que a presença das amostras nas regiões de bolhas e de "splash" pode chegar a 30%.

Tabela 3.10: Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão.

Amostras de Combustível: Cilindros de Madeira : $\phi = 2,3 \text{ cm}$ e $\rho = 0,55 \text{ g/cm}^3$		
Leito de Esferas de Vidro:	$d_p = 1,0 \text{ mm}$	$U_{mf} = 0,83 \text{ m/s}$
Nº de Amostras	:	10
Comprimento (cm)	:	4,0
U (m/s)	:	1,0

Distribuição média das amostras no leito (%)

Emulsão - 70%

Região de Bolhas - 13%

Região de "Splash" - 17%

A Tabela 3.11 mostra a ocorrência de amostras (de mesmo tamanho 2,0x2,3 cm) fora da emulsão, nas regiões de bolhas e de "splash"; os valores correspondentes estão graficados nas Figuras 3.8 e 3.9, respectivamente.

Tabela 3.11- Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão

Amostra de Combustível: Cilindros de Madeira 2,0 x 2,3 cm										
Leito de Areia: $0,42 < d_p < 0,59$ mm $U_{mf} = 0,3$ m/s										
Região de Bolhas										
U (m/s)	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3
Nº de Amostras	5		10		20		30		40	
Densidade (g/cm ³)	0,33									
Nº de Ocorrências (%)	0,0	3,3	0,6	2,0	0,0	1,3	0,0	2,9	1,0	0,6
Densidade (g/cm ³)	0,55									
Nº de Ocorrências (%)	0,0	3,3	0,6	1,0	0,5	1,0	0,2	0,6	0,5	0,7
Densidade (g/cm ³)	0,80									
Nº de Ocorrências (%)	1,0	1,0	0,5	1,1	0,0	0,0	0,0	0,4	0,1	0,0
Região de "Splash"										
U (m/s)	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3	0,9	1,3
Nº de Amostras	5		10		20		30		40	
Densidade (g/cm ³)	0,33									
Nº de Ocorrências (%)	2,9	6,7	7,2	8,0	8,8	2,5	8,0	1,9	6,3	6,1
Densidade (g/cm ³)	0,55									
Nº de Ocorrências (%)	3,0	5,6	3,3	2,9	3,3	2,7	1,6	2,4	2,4	2,0
Densidade (g/cm ³)	0,80									
Nº de Ocorrências (%)	1,0	2,7	2,0	1,7	2,1	2,0	2,0	2,3	2,0	2,4

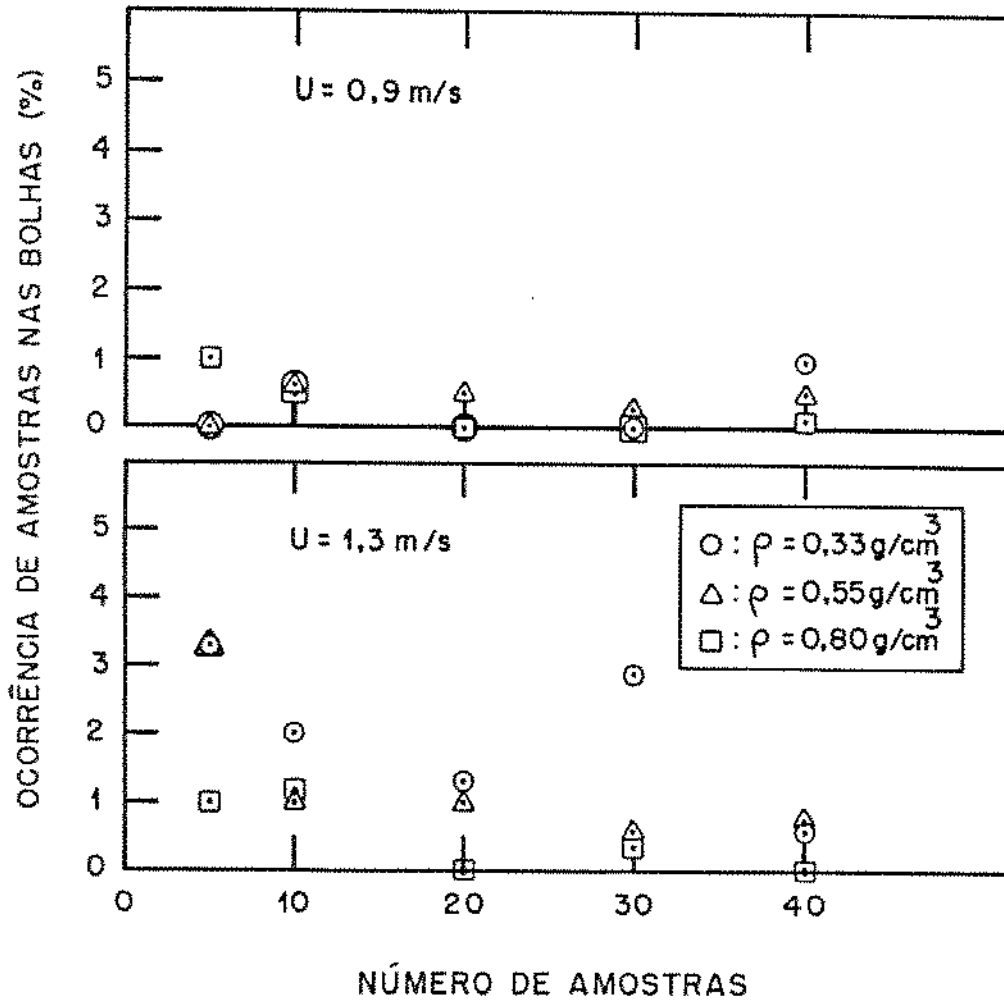


Figura 3.8: Ocorrência de Amostras na Região de Bolhas em Função do Número de Amostras de Combustível no Leito - Amostras de 2,0 x 2,3 cm.

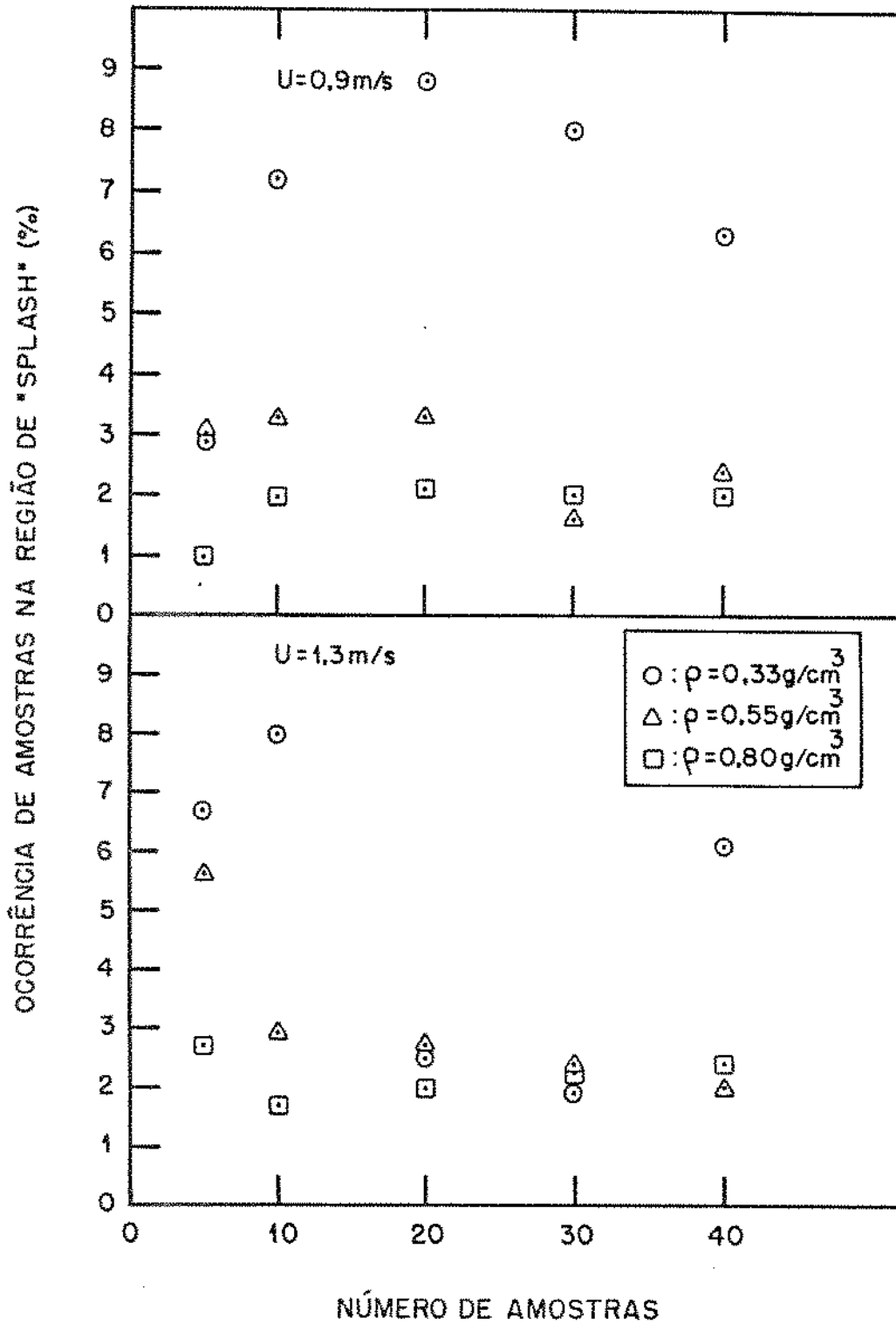


Figura 3.9: Ocorrência de Amostras na Região de "Splash" em Função do Número de Amostras de Combustível no Leito - Amostras de 2,0 x 2,3 cm.

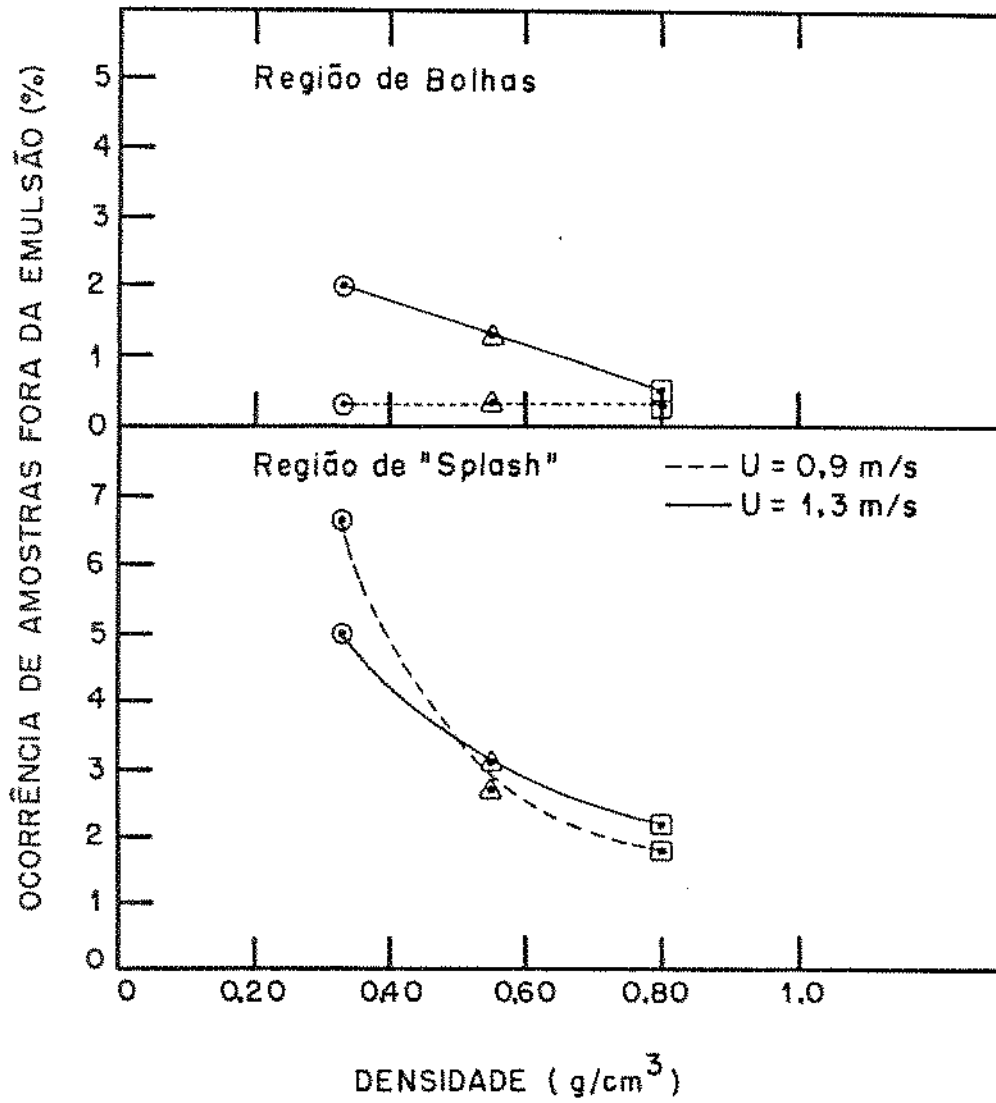


Figura 3.10: Ocorrência de Amostras Fora da Emulsão em Função da Densidade das Amostras - Amostras de 2,0 x 2,3 cm.

Pode-se verificar que a presença de amostras na região de bolhas aumenta com a velocidade do ar, diminuindo na região de "splash". Esses resultados podem ser atribuídos a que o ar que excede o necessário para estabelecer o regime fluidizado atravessa o leito formando bolhas, ou seja, quanto maior a vazão, maior o volume de bolhas e, portanto, maior a possibilidade das amostras de combustível surgirem dentro delas. Adicionalmente, pode-se argumentar que o aumento da velocidade de fluidização promove uma diminuição da densidade do leito e, proporcionalmente, aumenta a densidade relativa das amostras, provocando uma melhor mistura e diminuindo a porcentagem de ocorrências das amostras na região de splash.

A influência da densidade das amostras na sua ocorrência fora da emulsão pode ser vista na Figura 3.10, para as regiões de bolhas e de splash. Os valores utilizados foram obtidos através da média das porcentagens apresentadas na Tabela 3.11.

Pode-se observar que a porcentagem de ocorrências fora da emulsão diminui com o aumento da densidade das amostras. Pode-se constatar novamente o aumento da ocorrência de amostras na região de bolhas, produzido pelo aumento da velocidade superficial do ar.

3.3-Conclusões

Os resultados dos testes a frio sobre a distribuição das amostras de combustível dentro do leito fluidizado, mostraram que:

- A distribuição das amostras de combustível fora da emulsão é fortemente influenciada pelo regime de fluidização, expresso em função da razão U/U_{mf} :

- Para cada valor de densidade das amostras de madeira, o aumento de seu tamanho provoca um aumento no número de ocorrências de amostras fora da emulsão. O efeito do tamanho das amostras no leito é favorecido e melhor notado para baixos valores da razão U/U_{mf} .

- A principal região de ocorrência de amostras fora da emulsão é a região de "splash", para todos os valores de densidade e de tamanho das amostras testadas.

- Não se verificou um efeito significativo da população na ocorrência de amostras fora da emulsão.

- O aumento da velocidade do ar produz um aumento no tempo de contato entre amostra de combustível e a região de bolhas. O aumento da velocidade de fluidização promove uma diminuição da densidade do leito, aumentando a densidade relativa das amostras de combustível, o que favorece a melhor mistura entre as amostras e os inertes do leito e diminui a ocorrência de amostras na região de "splash".

- A diminuição da densidade das amostras favorece ao aumento de sua ocorrência fora da emulsão.

Capítulo 4- Estudo dos Fatores que Influenciam a Taxa de Queima de Carvões Vegetais em um Queimador do Leito Fluidizado Borbulhante.

Tradicionalmente os estudos da queima em leito fluidizado, se referem ao estudo da oxidação do carbono fixo do combustível. Essa ênfase no estudo de carbono sólido, em geral na forma de pequenas esferas, deve-se ao fato do carvão mineral apresentar em média um conteúdo baixo de matéria volátil em comparação com a biomassa, e também porque o tempo de queima do carbono sólido é muito maior do que o tempo de queima dos voláteis.

Por isso, em grande parte dos trabalhos sobre combustão fluidizada, considera-se que a devolatilização do combustível ocorre imediatamente após a sua alimentação no leito e estuda-se a queima de coque, eletrodos de carbono, e mesmo de grafite como representativa da combustão de carvão mineral em leito fluidizado.

Também para biomassa o tempo de queima completa do carbono fixo é muito maior do que o tempo de queima dos voláteis, de maneira que a maior parte da biomassa combustível dentro do leito é efetivamente carvão vegetal ou o carbono fixo resultante da devolatilização da biomassa.

Nesse capítulo são apresentadas as medidas da taxa específica de queima dos carvões vegetais de sabugo de milho, de endocarpo de babaçu, de casca de Eucaliptus Alba, e de Eucaliptus Saligna. São apresentadas também as taxas de queima de grafite, a qual foi utilizada como padrão comparativo.

4.1- Dispositivo Experimental.

Foi construído um mini-leito, esquematizado na Figura 4.1, a partir de uma chapa de aço inóx 310, para melhor resistência à oxidação do metal na temperatura dos testes. Foi dimensionado como um tubo de 8,4 cm de diâmetro interno e 50 cm de altura, possuindo uma placa distribuidora com furos de 1 mm soldada à base.

O mini-leito foi dotado de um sistema de aquecimento do gás com controle da temperatura que inclui:

- aquecimento elétrico do ar secundário até cerca de 400°C,
- aquecimento do ar primário através da queima de GLP.
- aquecimento elétrico da parede externa do mini-leito.

O controle da vazão do GLP e das vazões de ar primário e ar secundário, através de rotâmetros adequados, permite ajustar a concentração de O_2 e de CO_2 do gás de fluidização.

Além destes três meios de aquecimento do gás, utilizados para adequar a temperatura de operação do mini-leito, a variação da quantidade do isolamento térmico também foi usada para controle em temperaturas mais baixas, próximas de 600°C.

Acoplou-se lateralmente ao mini-leito um sistema que permite o aquecimento e o resfriamento da amostra de combustível em uma corrente de N_2 , para inibir o início ou a continuação da queima das amostras testadas, possibilitando o controle do tempo de queima e a realização de testes com préaquecimento do combustível até a temperatura do leito.

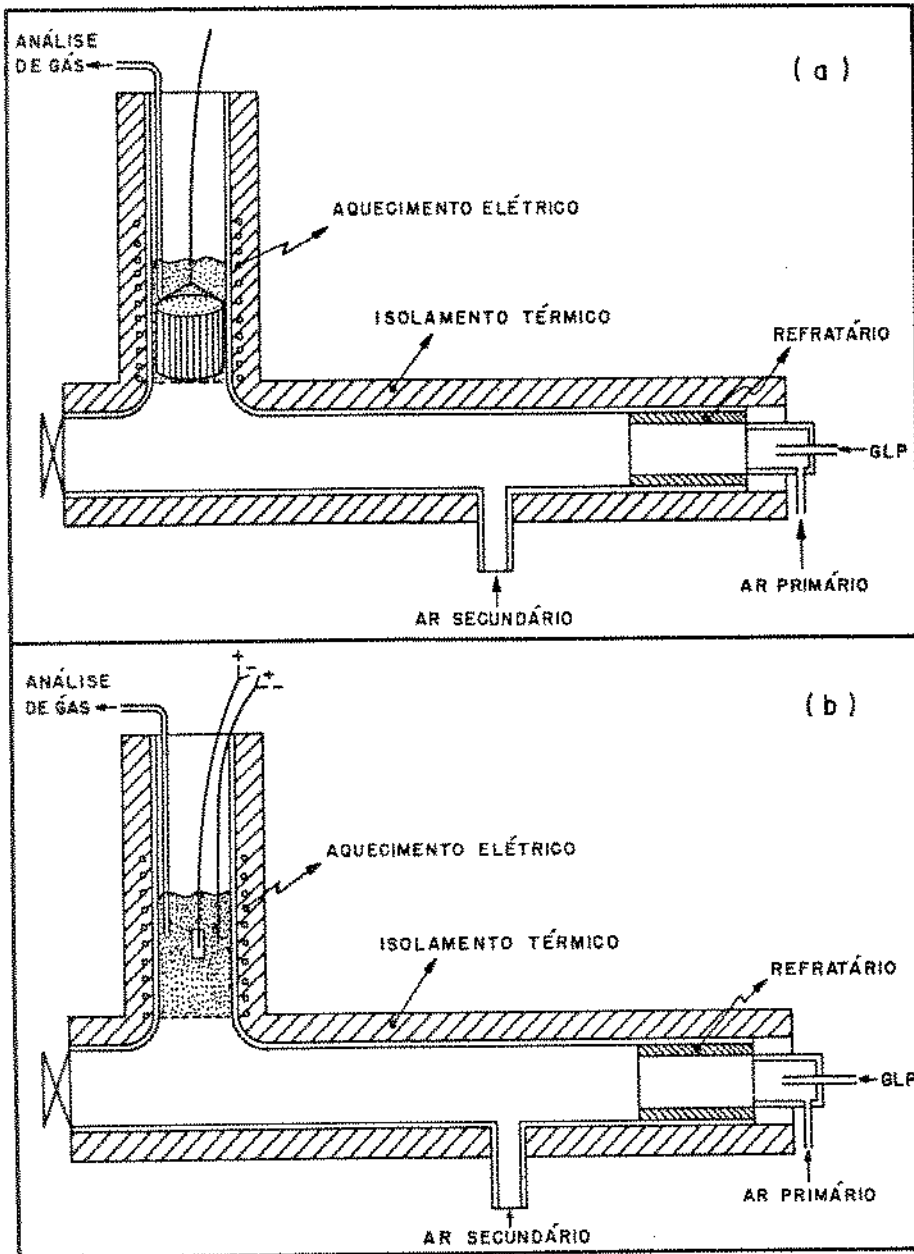


Figura 4.1- Mini-leito de Combustão Fluidizada

- a) Esquema do mini-leito com cesto de tela metálica para colocação e retirada das amostras no leito.
 b) Esquema do mini-leito e do método de colocação e retirada das amostras no leito presas ao termopar.

Utilizou-se nos experimentos um aparelho de Orsat para a análise das concentrações de O_2 , CO_2 , e CO , além de um analisador contínuo de O_2 ; dois rotâmetros para medida das vazões de ar e de GLP; termopares tipo K para a medida de temperatura; um registrador potenciométrico para graficar o sinal dos termopares da temperatura do leito e das amostras de combustível; um pirômetro digital para controle de temperatura do leito e uma balança analítica (0,1 mg).

4.2- Preparação de Amostras para os Testes de Queima.

As amostras de combustível vegetal foram carbonizadas até a temperatura de $1000^{\circ}C$ em vácuo, para a eliminação da matéria volátil, controlando-se a taxa de aquecimento. Os carvões vegetais de sabugo de milho, de endocarpo de babaçu e de casca de Eucaliptus Alba, foram preparados com uma taxa de aquecimento de 2 graus por minuto. O carvão vegetal de Eucaliptus Saligna necessitou uma taxa mais lenta, de um grau por minuto, a qual foi a taxa mais lenta possível com o equipamento utilizado. Esse procedimento foi necessário devido ao fato de que as amostras de eucalipto explodiam dentro do leito quando carbonizadas a taxas mais rápidas de aquecimento. Ainda assim os testes com carvão vegetal de eucalipto só foram possíveis utilizando-se um preaquecimento lento (numa corrente de N_2) até a temperatura de teste.

O fato das amostras de carvão vegetal de eucalipto explodirem quando colocadas dentro do leito foi atribuído ao choque térmico em amostra muito porosa, com estrutura de fibras longitudinais, que sofreu diminuição de volume durante o processo de car-

bonização, com deformação da sua forma inicial e acúmulo de tensões. Para os outros carvões vegetais, embora tenha ocorrido diminuição do volume das amostras, a deformação em relação à forma inicial foi de grau menor.

As amostras foram preparadas na forma de pequenos paralelepípedos ou cilindros. A forma das amostras foi determinada em função de características próprias dos combustíveis como, por exemplo:

- Os sabugos de milho apresentam geometria cilíndrica, a qual foi mantida.
- As cascas de eucalipto se apresentam como placas as quais, após a carbonização, têm a espessura reduzida para cerca de 5 a 10 mm. Por isso o carvão vegetal de casca foi preparado na forma de pequenos paralelepípedos com laterais entre 5 e 10 mm e a maior dimensão ficando próxima de 30 a 40 mm.
- O endocarpo de babaçu corresponde à parte interna do coco de babaçu. Possui uma estrutura rígida e muito dura para ser cortada. Após a carbonização o carvão vegetal obtido não pode ser cortado mesmo com serra metálica, e sua dureza não permite que seja usinado no torno. Optou-se pelo uso do torno na preparação de cilindros antes da carbonização. O método foi possível porque a carbonização do babaçu produz pouca deformação da amostra em relação à forma inicial.
- As amostras de carvão de Eucaliptus Saligna e de Grafite foram cortadas em pequenos paralelepípedos acompanhando a geometria do carvão de Cascas.

Antes de serem usadas nos testes as amostras tiveram a massa medida livre de umidade, sendo guardadas a seguir ao ambiente. As dimensões das amostras foram determinadas com uso de um paquímetro.

As amostras de combustível foram caracterizadas quanto a:

- Análise imediata: cinzas, voláteis e carbono fixo;
- Porosidade e densidade real, utilizando-se o método de picnômetro;
- Densidade aparente;
- Área específica, pelo método de BET, usando-se N_2 , e
- Reatividade

As medidas de reatividade foram realizadas neste trabalho adaptando-se um aparelho usado para a determinação de carbono e hidrogênio. Foram realizados testes à $950^{\circ}C$ com fluxo de oxigênio puro através do reator e mediu-se a taxa de conversão $C + O_2 \Rightarrow CO_2$, para um intervalo de tempo de 5 minutos. Adotou-se esse método devido à inadequação de alguns testes de reatividade clássicos, como o teste C.A.B. (Critical Air Blast), que apresenta grande probabilidade de erro devido a detalhes construtivos e operacionais do equipamento, conforme descrito por Brewin e Thompson (1937) e por Askey e Doble (1937).

Outros testes mais comuns se baseiam na reação de Boudouard: $CO_2 + C \Rightarrow 2CO$, e são descritos, por exemplo, por Daly e Budge (1974) e por Hippo e Walker Jr. (1975). Tais testes aplicam-se principalmente à reação de gasificação e não à de combustão, além de apresentarem validade restrita a alguns intervalos de temperatura. Outra dificuldade a ser lembrada refere-se ao fato da reação de Boudouard ser mais relevante para leitos com grande con-

centração de massa de combustível, como no caso de alto forno, contrastando com as condições da combustão em leito fluidizado, onde se opera com pequena concentração de combustível no leito, em temperaturas abaixo de 1000°C .

4.3- Metodologia dos Testes.

Os testes de queima foram realizados com um mini-leito de combustão fluidizada, esquematizado na Figura 4.1. As partículas do material inerte do leito foram fluidizadas com gás aquecido simultaneamente, pela queima de GLP e por aquecimento elétrico. As variações da temperatura do leito foram efetuadas por mudanças na taxa de queima de GLP e no fornecimento de potência elétrica. A temperatura foi medida através de termopares tipo K, ligados a um pirômetro digital, e registrada graficamente através do uso de um registrador potenciométrico.

Antes da realização dos testes esperava-se até que a temperatura do leito se estabilizasse no valor desejado. A temperatura do leito era medida antes e no final de cada teste, sem a presença da amostra de combustível no leito, pois esta altera o valor da temperatura do leito.

4.3.1- Medida da Diferença de Temperatura (DT) entre a Amostra de Combustível e os Inertes do Leito Fluidizado.

A temperatura em que ocorre a reação de queima é um parâmetro importante, sendo um dos fatores determinantes da taxa de queima do combustível.

A temperatura da amostra (T_p) foi adotada como sendo a temperatura de seu centro, medida através de um termopar inserido através de um furo feito ao longo de sua maior dimensão.

Em geral a temperatura de uma amostra queimando é maior do que a temperatura do leito de inertes. Calculou-se a diferença de temperatura entre a amostra queimando (T_p) e a temperatura do leito (T_l) para diferentes condições de operação do queimador como uma maneira de, conhecendo-se a temperatura do leito, poder estimar a temperatura da amostra de combustível.

Devido ao fato de que uma amostra quando está queimando emite radiação para um termopar localizado nas suas imediações, a DT foi definida como a diferença de temperatura entre o centro da amostra e o leito. A temperatura do leito medida, conforme já foi dito, sem a presença da amostra, como a média dos valores obtidos antes e depois da queima. Assim,

$$DT = T_p - T_l \quad (4.1)$$

4.3.2- Medida da Taxa de Aquecimento da Amostra de Combustível e do Tempo de Ignição.

Como a medida de temperatura da amostra foi realizada com termopar fixo no seu centro, a taxa de aquecimento foi calculada como sendo a razão da variação de temperatura por unidade de tempo e pela metade da menor dimensão da amostra. O cálculo foi realizado considerando-se o tempo gasto para a temperatura da amostra alcançar o valor de 500°C . Adotou-se esse procedimento porque

a taxa de aquecimento depende fortemente das dimensões da amostra. Tomando-se, por exemplo, uma amostra com dimensões 40x10x10 mm, a taxa de aquecimento é determinada, claramente, pela menor dimensão. A escolha da temperatura de 500°C para o cálculo deveu-se ao fato de que, quando o termopar no centro da amostra registra 500°C, a sua superfície já apresenta ignição e temperatura maior de que a do leito; a partir daí, portanto, a taxa de aquecimento não é mais determinada pelo leito.

Sabe-se que a taxa de aquecimento de um corpo sólido em leito fluidizado pode depender de vários fatores, como a condutividade térmica do corpo e dos inertes do leito, a granulometria dos inertes, o regime de fluidização, etc...

A medida da taxa de aquecimento não está diretamente relacionada com o tempo necessário para a ignição do combustível dentro do leito, estimado a partir da observação visual do contraste entre as cores da amostra e do leito. Inicialmente a amostra se destaca como mais escura que o leito; à medida que ela se aquece, se confunde com a incandescência do leito para, posteriormente, brilhar mais intensamente do que o leito, indicando que a superfície da amostra está a uma temperatura maior.

O tempo de ignição foi estimado como o intervalo decorrido entre a colocação da amostra no leito e o instante em que a radiação da amostra e a do leito são iguais. O tempo real de ignição, no entanto, deve ser menor que o obtido por esse método visual, pois a amostra pode apresentar ignição para valores de temperatura menor que a do leito.

4.3.3- Medida do Tempo para a Combustão Completa.

O tempo para a combustão completa foi obtido a partir da observação visual das amostras queimando no leito. Mesmo as amostras mais densas, como as de grafite ou de carvão vegetal de babaçu, apresentaram boa recirculação, permitindo a sua visualização no leito.

4.3.4- Medida da Taxa Específica de Queima

A taxa específica de queima foi definida como a razão entre a perda de massa da amostra de combustível pelo produto da sua área geométrica superficial inicial com o tempo de residência da amostra dentro do leito, ou seja:

$$M = \frac{DM}{Ag \times t_r} \quad (4.2)$$

onde:

DM = perda de massa (g);

Ag - área geométrica superficial inicial da amostra (cm²), e

t_r = tempo de residência (s)

A medida da taxa específica de queima foi realizada através da queima de amostras individuais dos diferentes combustíveis durante um determinado tempo de residência (t_r) dentro do leito, tal que as dimensões da amostra não se alterassem significativamente.

As amostras foram levadas ao leito de duas maneiras:

- dentro de um cesto de tela metálica, com diâmetro um pouco inferior ao do leito, conforme Figura 4.1a, o que não alterou as

condições de fluidização, ou.

- seguras através de um termopar flexível, inserido no corpo da amostra através de um furo ao longo de sua maior dimensão, conforme a Figura 4.1b. Embora durante a sua permanência dentro do leito a amostra estivesse fixa ao termopar, ela podia oscilar dentro do leito devido à flexibilidade do fio do termopar.

Findo o tempo de residência desejado, as amostras eram retiradas do leito e resfriadas num jato de nitrogênio, para impedir a continuação da queima. Após o resfriamento as amostras eram guardadas em um dessecador até a medida da massa final.

A medida da taxa específica de queima foi determinada em função dos seguintes parâmetros:

- Concentração de oxigênio no gás de fluidização, com valores de 5%, 10% e 15% em volume:

- Temperatura, no intervalo de 600°C a 1100°C;

- Velocidade de fluidização: 1, 2 e 3 m/s;

- Granulometria do material do leito:

alumina: 60, 46 e 30 mesh (0,25; 0,32 e 0,54 mm);

areia: $0,59 < d_p < 0,80$ mm, $0,42 < d_p < 0,59$ mm e $0,25 < d_p < 0,42$ mm.

- Tamanho da amostra, e

- Existência ou não de pré-aquecimento da amostra.

4.4- Apresentação dos Resultados Experimentais

4.4.1- Diferença de Temperatura (DT) entre a Amostra de Combustível e o Leito em um Queimador de Leito Fluidizado Borbulhante.

1) Efeito da Posição da Amostra Dentro do Leito

A variação da DT com a posição da amostra no leito ficou demonstrada com a sua colocação próxima ao fundo e à superfície do leito, ainda totalmente imersa. Os resultados mostraram que a temperatura da amostra (T_p) aumenta quando colocada próxima ao fundo do leito e diminui quando colocada próxima à superfície. Observou-se a precaução de obter a estabilização de T_p antes de promover a variação na posição da amostra.

Atribui-se tal variação ao fato que, próximo ao fundo do leito, o ar sai do distribuidor na forma de jatos que atingem a amostra e aumentam a transferência de massa por convecção forçada (efeito semelhante ao de uma forja), aumentando a taxa de queima e, conseqüentemente, a sua temperatura. Além disso as perdas por radiação são menores no fundo, onde a troca ocorre entre a superfície da amostra de carvão, e um meio constituído de partículas inertes quentes. Próximo à superfície do leito (quando inclusive se pode ver a amostra brilhando mais intensamente que o leito), parte da superfície radiante da amostra tem uma visão parcial de um ambiente mais frio, aumentando a transferência de calor.

Para os testes apresentados nesse trabalho observou-se a precaução de manter-se a posição da amostra no centro do leito,

como na Figura 4.1a ou então livre para recircular pelo volume do leito, como na Figura 4.1b.

(II) Efeito da Temperatura do Leito e da Concentração de Oxigênio

Valores da variação de DT em função da temperatura do leito para carvão vegetal e grafite são apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3, respectivamente, para duas concentrações de oxigênio e duas granulometrias do material do leito. O aumento da DT em função da concentração de oxigênio é explicado pelo aumento da taxa de queima, conforme pode ser visto nas Figuras 4.4 e 4.5. A análise dos gráficos da taxa de queima e da variação de DT, mostra que:

- Para carvão vegetal, enquanto a taxa de queima está aumentando a DT também cresce. Quando a taxa de queima tende a ficar constante, o que ocorre em torno de $T_L = 750^\circ\text{C}$, a DT decresce com o aumento da temperatura do leito.
- Para grafite, a taxa de queima cresce continuamente até 950°C . Dentro deste intervalo a DT também cresce, acompanhando o aumento da taxa de queima.

(III) Influência do Tempo de Queima.

A Figura 4.6 apresenta a variação da temperatura de uma amostra de carvão vegetal de eucalipto com o tempo de queima. Verifica-se que a amostra atinge um platô de temperatura, no qual há um aumento lento da temperatura a uma taxa aproximadamente constante, ao mesmo tempo em que ocorre a queima, diminuindo as

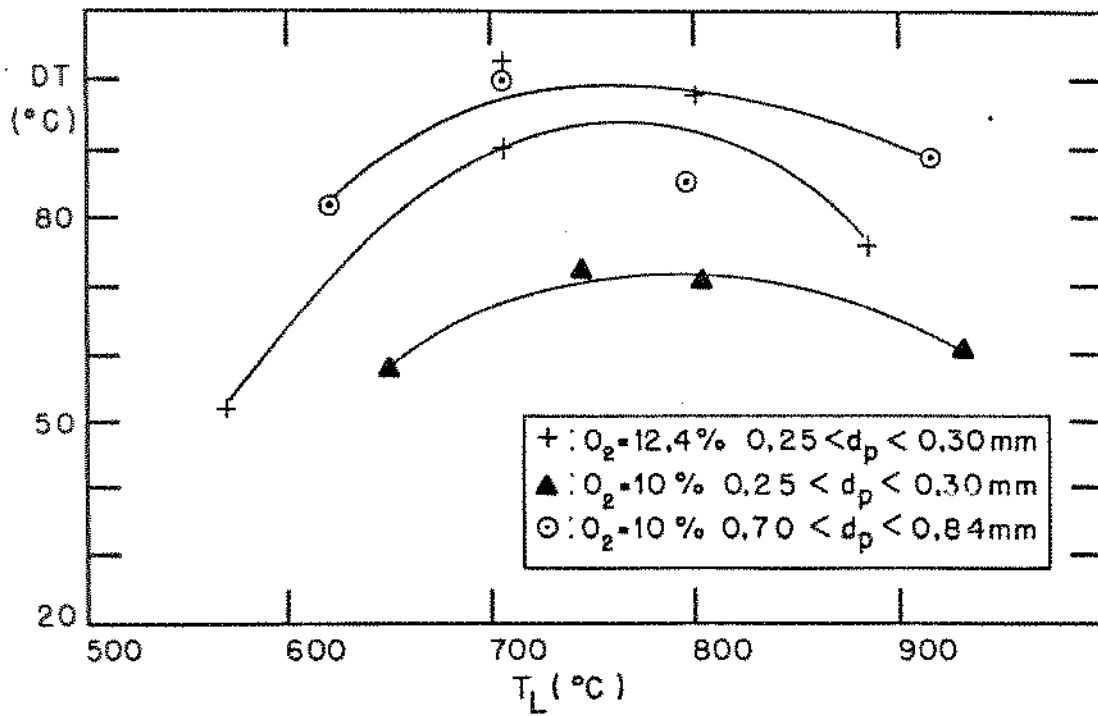


Figura 4.2- Gráfico de DT em função da Temperatura do Leito para Carvão Vegetal de Eucalipto.

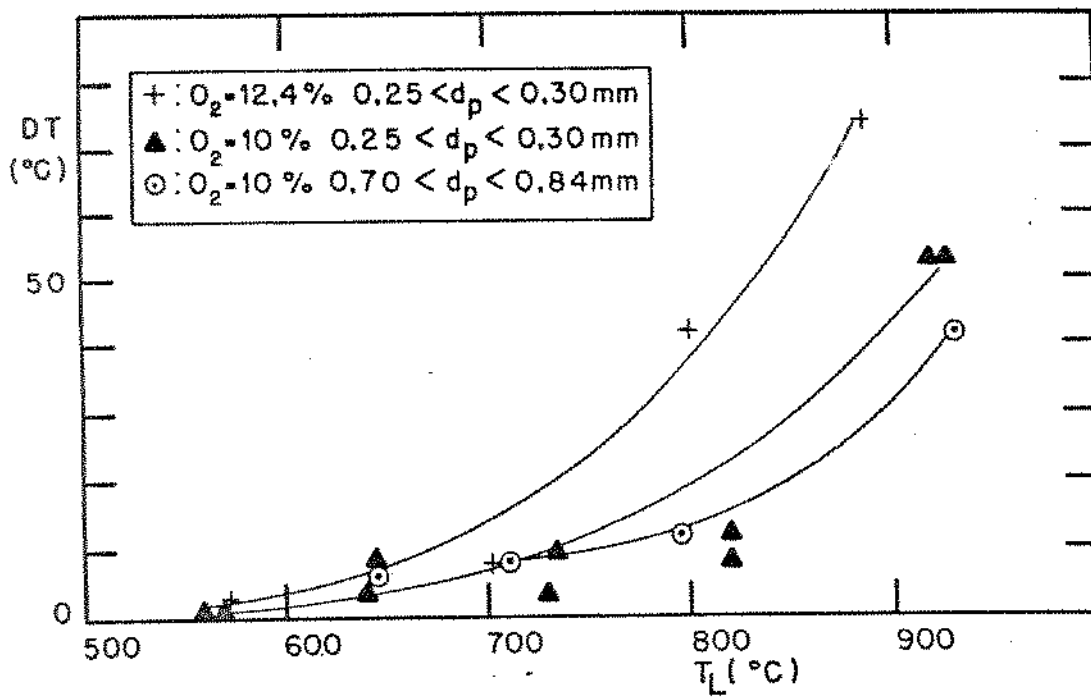


Figura 4.3- Gráfico de DT em função da Temperatura do Leito para Grafite.

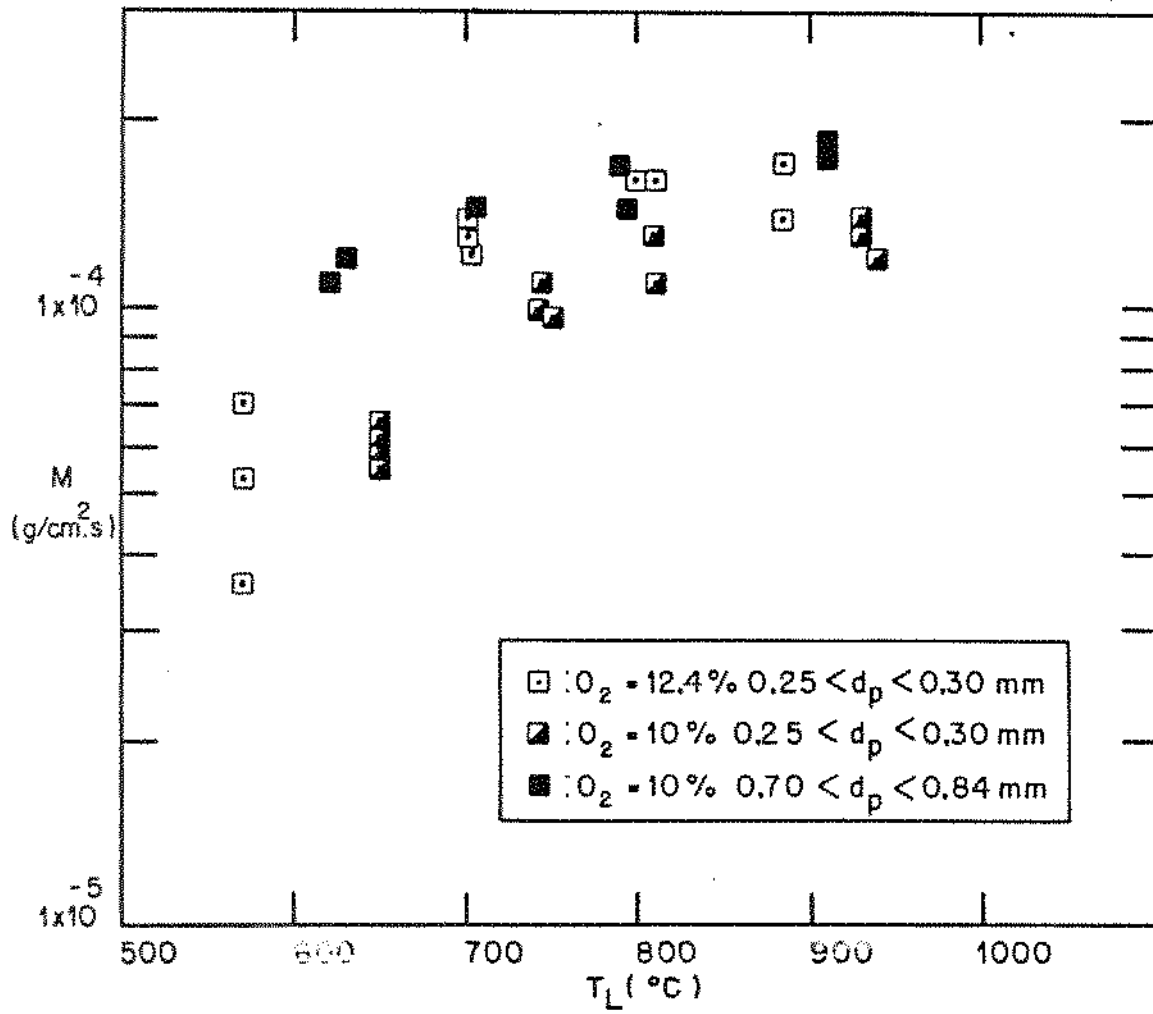


Figura 4.1- Gráfico da taxa específica de queima em função da temperatura do leito, para carvão vegetal de eucalipto.

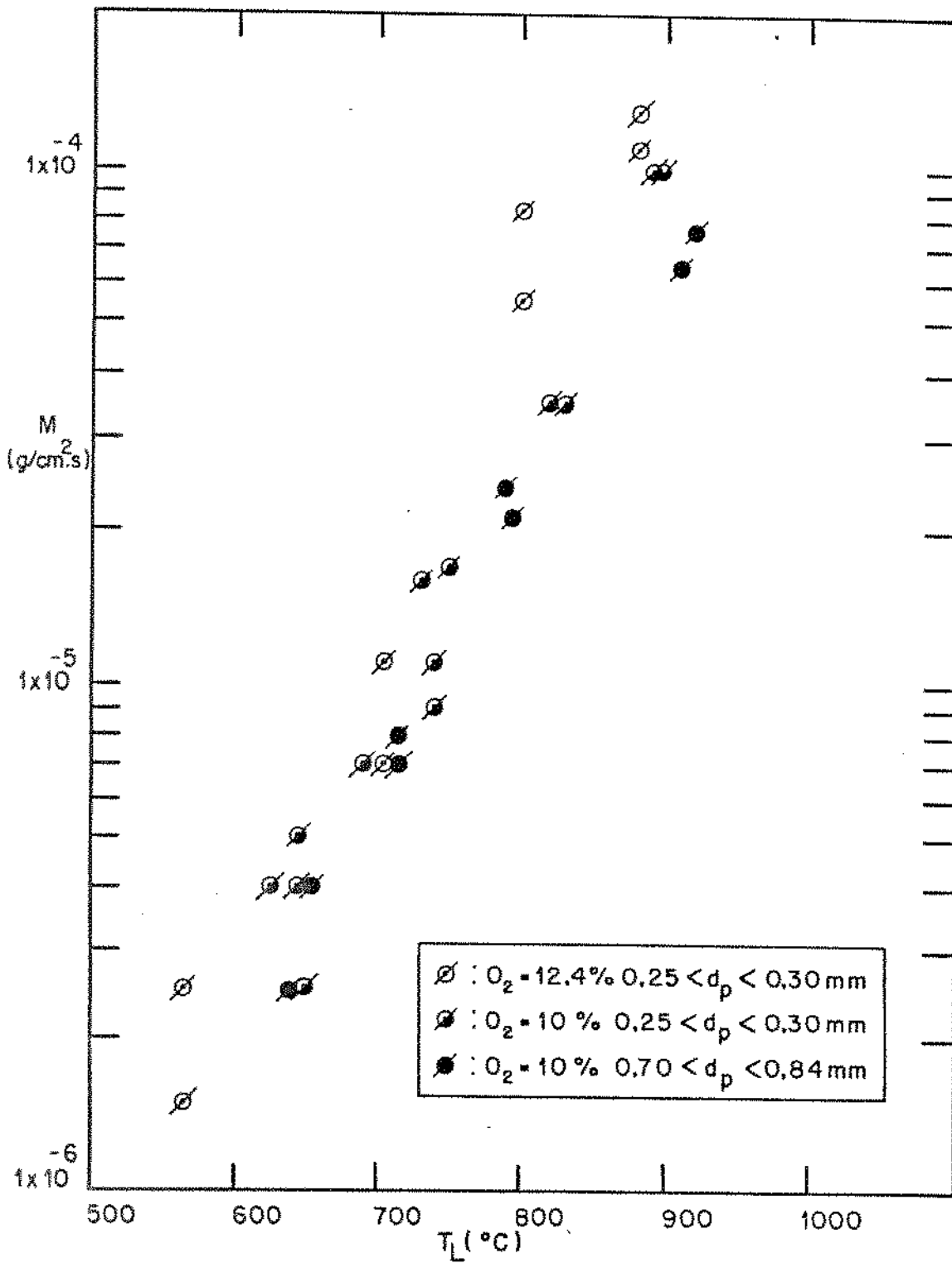


Figura 4.5- Gráfico da taxa específica de queima em função da temperatura do leito para Grafite.

dimensões da amostra e provocando uma aproximação da frente de chama em relação ao termopar colocado no seu centro.

Para amostras de coque com diâmetros da ordem de 1 a 2 mm, segundo Avedesian e Davidson (1973), atribui-se tal efeito a:

- Diminuição das perdas por radiação devido à diminuição da área das superfícies irradiantes com a queima da amostra.
- Quando uma amostra de combustível é grande em relação aos inertes do leito, o calor pode ser trocado pelo contato com os inertes; mas quando a queima diminui a amostra de combustível até a mesma dimensão dos inertes, a troca de calor ocorre através de uma fina camada limite de gás, cuja condutividade térmica é menor do que a do material do leito.

No entanto, para as dimensões das amostras analisadas: 40x10x10 mm, tais efeitos não podem ser atribuídos à alteração no coeficiente de transferência de calor da partícula para o leito, devendo-se principalmente ao efeito de aproximação da frente de chama em relação ao termopar, como mostrado em La Nauze (1985a).

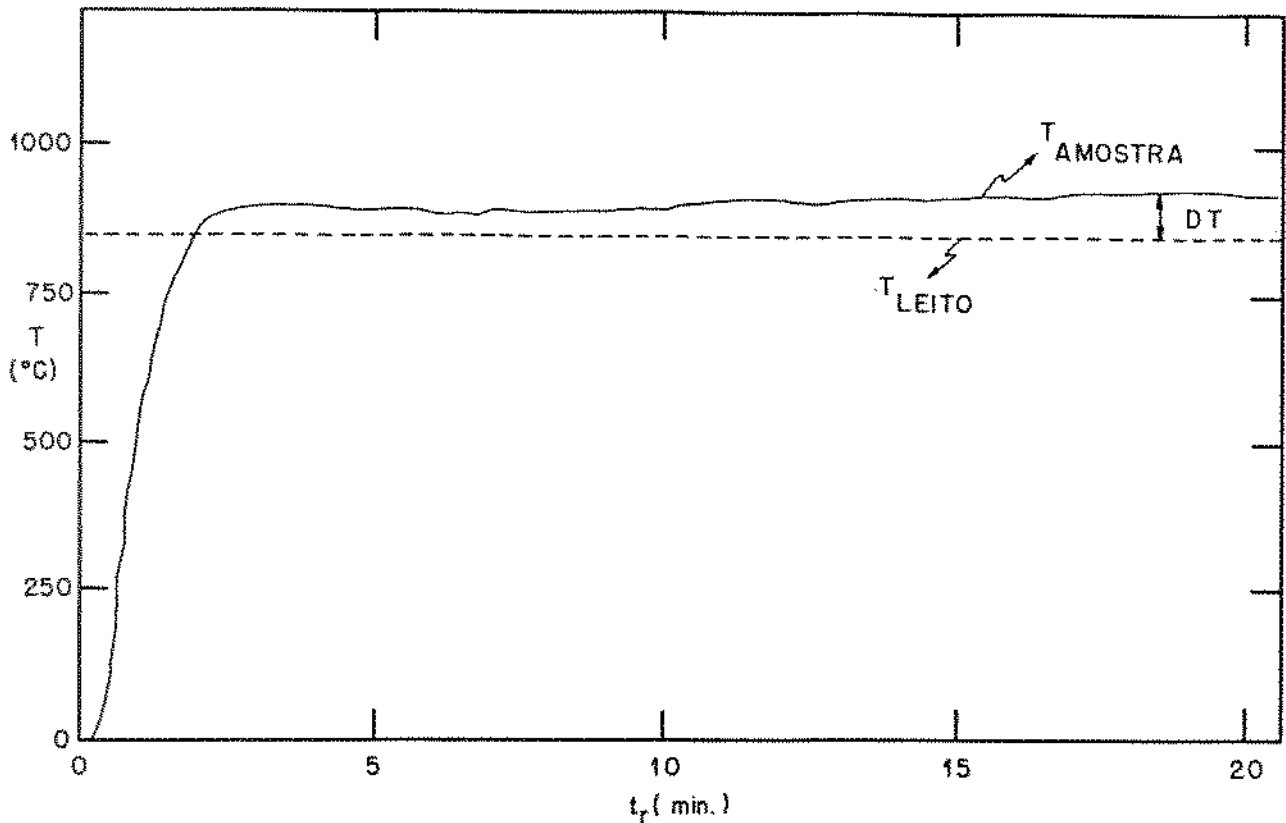


Figura 4.6- Temperatura da Amostra de Combustível em Função do Tempo de Residência no Leito.

4.4.2- Taxa de Aquecimento e Tempo de Ignição

A Figura 4.7 representa o mecanismo de aquecimento do centro da amostra de combustível. Resultados obtidos por Santos (1981) mostraram a presença constante de um pequeno patamar no perfil da temperatura no centro da amostra no início do aquecimento. Tal fato foi atribuído a não estarem as amostras totalmente secas, persistindo o patamar ao longo da duração do processo de secagem da amostra imersa no leito quente. A confirmação deste fato foi feita através do aquecimento de amostras secas, quando então não se re-

gistrou a ocorrência do patamar. O valor de temperatura do centro da amostra durante o processo de secagem foi da ordem de 100°C .

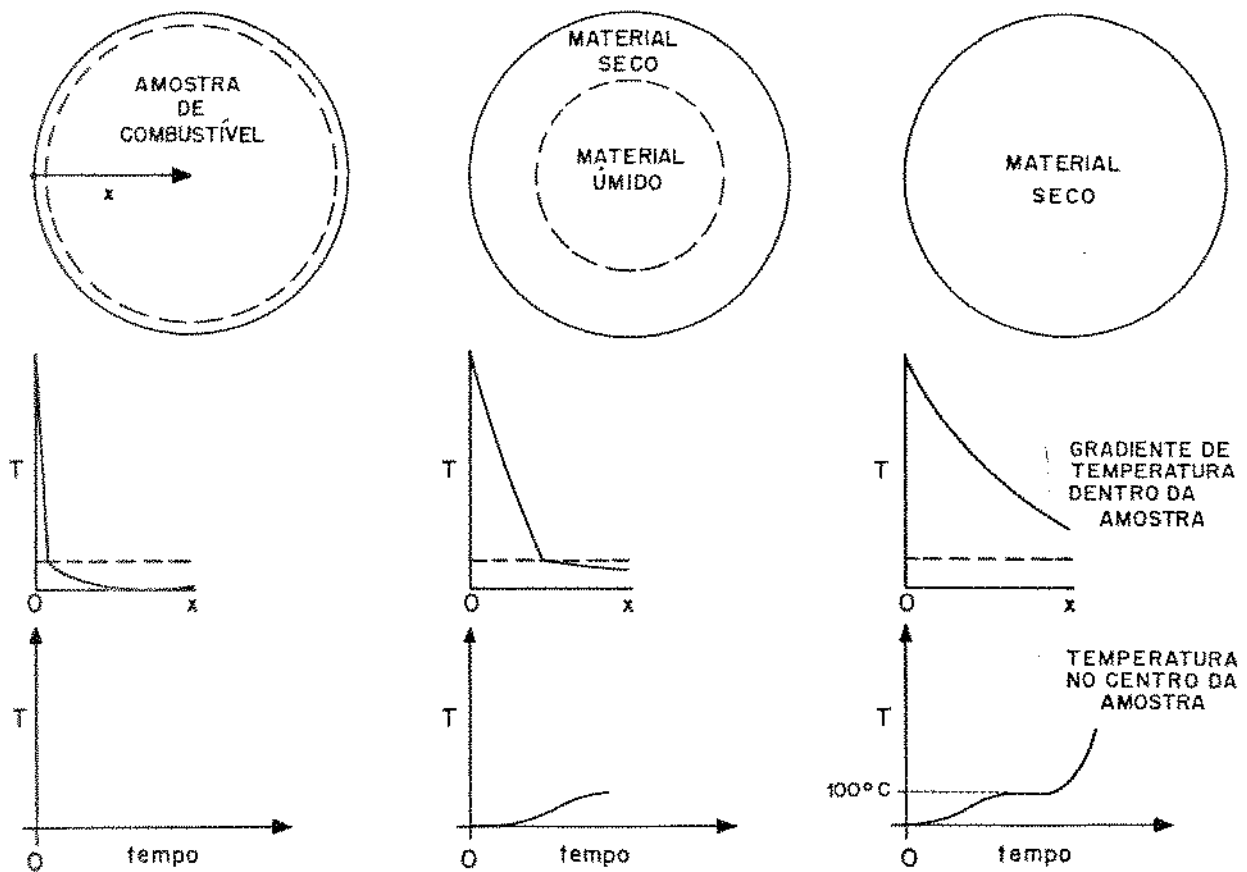


Figura 4.7- Mecanismo de Aquecimento do Centro da Amostra de Combustível.

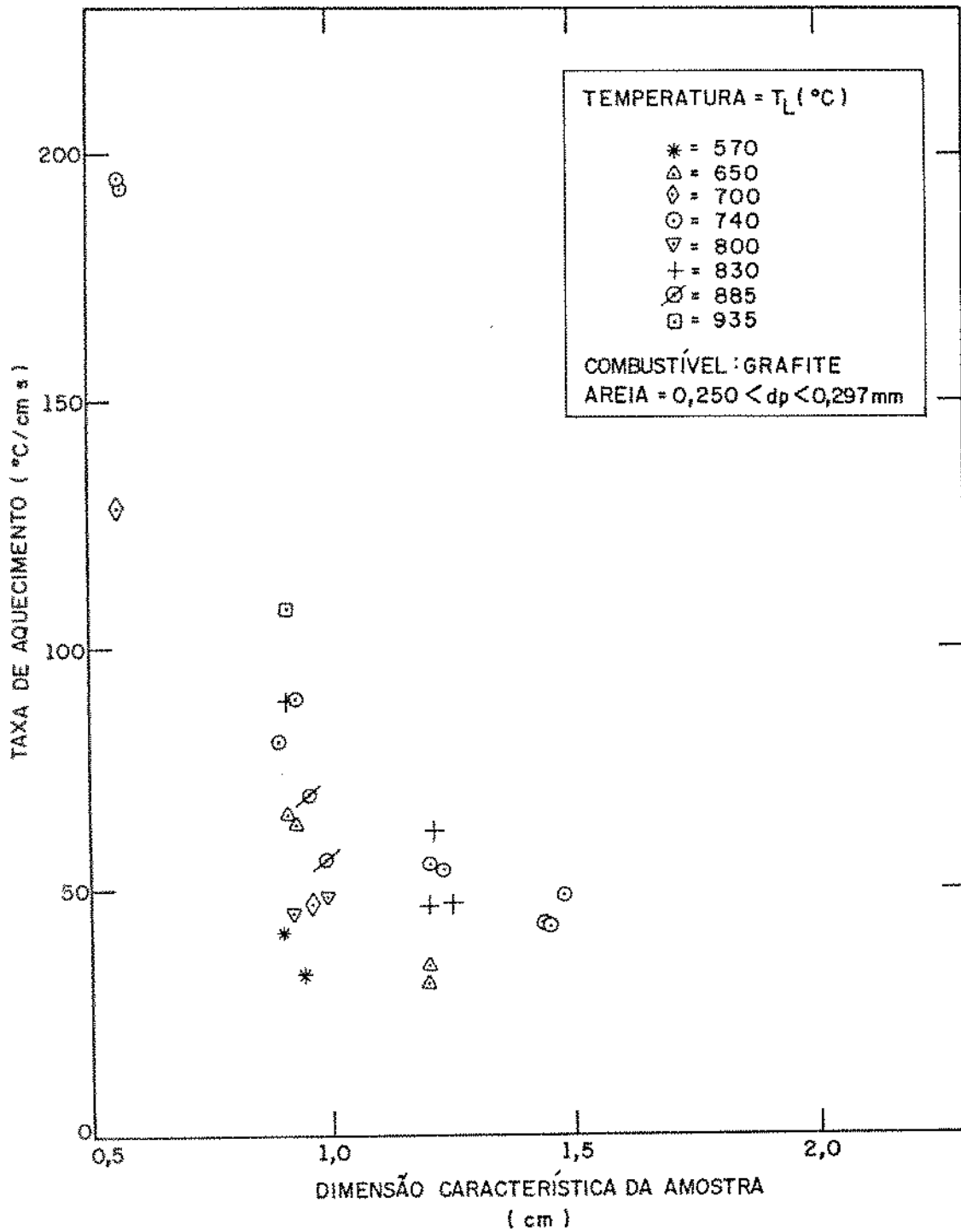
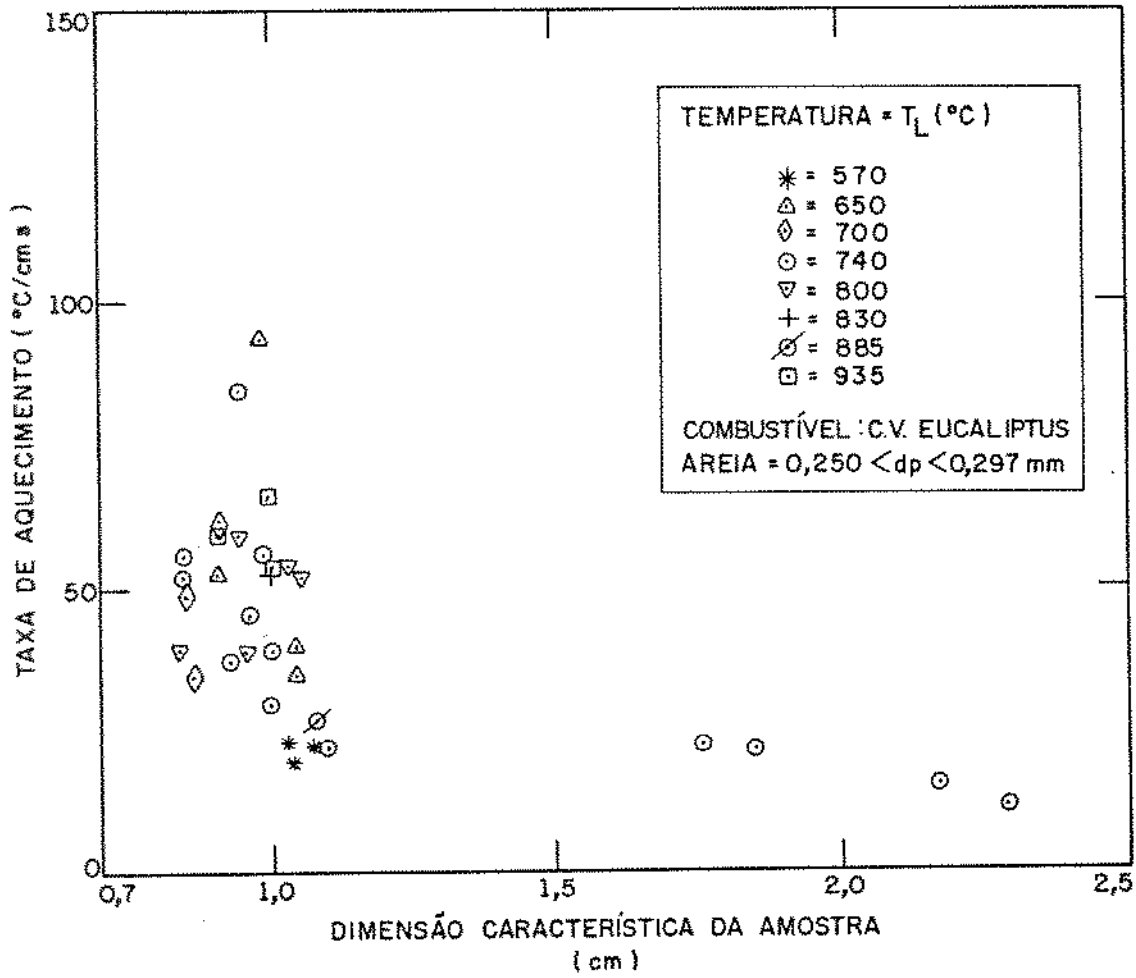


Figura 4.8- Taxa de Aquecimento de Amostras de Grafite.



A medida da taxa de aquecimento foi realizada para amostras secas de Grafite e Carvão Vegetal de Eucaliptus. Os resultados estão apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9.

A análise dos gráficos mostra que:

- Há forte influência do tamanho da amostra, com taxas maiores para menores dimensões.

- A taxa de aquecimento é favorecida pelo aumento na temperatura do leito. Os resultados sugerem, no entanto, que a taxa de aquecimento é uma função mais forte da granulometria da amostra do que da temperatura do leito.

- Os valores da taxa de aquecimento são maiores para a grafite do que para carvão vegetal. Esse resultado pode ser determinado pelos valores da condutividade térmica de cada material. Segundo dados de Rose e Cooper (1977), a condutividade térmica da grafite e do carbono próxima de 1000°C apresenta valores de 35-80 (W/m °K) e 3,0 (W/m °K), respectivamente.

Os valores da taxa de aquecimento para amostras em forma de paralelepípedo, com dimensão lateral entre 0,5 e 1,0 cm, são comparáveis aos citados por La Nause (1985b) para amostras esféricas de carvão mineral com diâmetros entre 0,5 e 1,0 cm.

Os valores do tempo de ignição para grafite e carvão vegetal de eucalipto variaram entre 15 e 20 s. Devido ao método utilizado, de observação visual da cor das amostras recirculando dentro do leito, não foi possível verificar uma diferença significativa entre o tempo de ignição dos dois combustíveis.

4.4.3- Taxa Específica de Queima

Os valores experimentais da taxa de específica de queima, definida pela equação 4.2, não levam em conta explicitamente as diferenças entre os combustíveis devido à: teor de cinzas, densidade, porosidade, área específica, etc. cujos valores característicos são apresentados na Tabela 4.1.

Testes foram realizados com o objetivo de estudar a influência das propriedades físicas dos combustíveis sobre a taxa específica de queima. Foram testados os seguintes materiais: grafite (utilizada como padrão comparativo), carvão vegetal de endocarpo de babaçu (C.V. Babaçu), carvão vegetal de sabugo de milho (C.V. Sabugo) e carvão vegetal de casca de eucaliptus alba (C.V. Casca).

Os testes foram realizados variando-se a temperatura do leito entre 600^o a 1000^oC para concentrações de oxigênio nos valores de 5%, 10% e 15% (em volume), com velocidades de fluidização de 1, 2 e 3 m/s.

O material inerte do leito foi alumina, usada em três granulometrias:

- 60 mesh ($d_p = 0,25$ mm)
- 46 mesh ($d_p = 0,32$ mm)
- 30 mesh ($d_p = 0,54$ mm)

Os valores obtidos para a taxa específica de queima M estão mostrados graficamente nas Figuras 4.10 a 4.20. Os resultados das Figuras 4.10 a 4.19 foram obtidos para concentração de oxigênio de 10%, enquanto os da figura 4.20 foram obtidos para concentrações de 5, 10 e 15%.

Tabela 4.1: Propriedades de Carvões Vegetais e de Grafite.

	GRAFITE	C.V. DE EUCA- LIPTUS SALIGNA	C.V. DE CASCA EUCALIPTUS ALBA	C.V. DE BABAQU	C.V. DE SABUGO DE MILHO
DENSIDADE APARENTE (g/cm ³)	1,8	0,36	0,5	1,2	0,26
DENSIDADE REAL (g/cm ³)	2,2	1,1	2,1	1,8	1,3
REATIVIDADE EM PÓ (% de massa inic.)	2,8%	6,7%	7,4%	5,2%	6,3%
REATIVIDADE EM PEDAÇO (g/cm ² .s)	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$25 \cdot 10^{-6}$	$7,3 \cdot 10^{-6}$
ÁREA ESPECÍFICA (N ₂)(m ² /g)	1,2	7,7	4,4	2,0	1,0
GINZAS (% massa)	0,2%	0,5%	17,8%	6,2%	3,3%
VOLÁTEIS (% massa)	1,6%	5,7%	13,7%	3,9%	5,8%
CARBONO FIXO (% massa)	98,2%	93,8%	68,5%	89,9%	90,9%
PODER CALORÍFICO (cal/g)	8150	----	5600	7070	7500
POROSIDADE (% volume)	18%	67%	76%	30%	80%

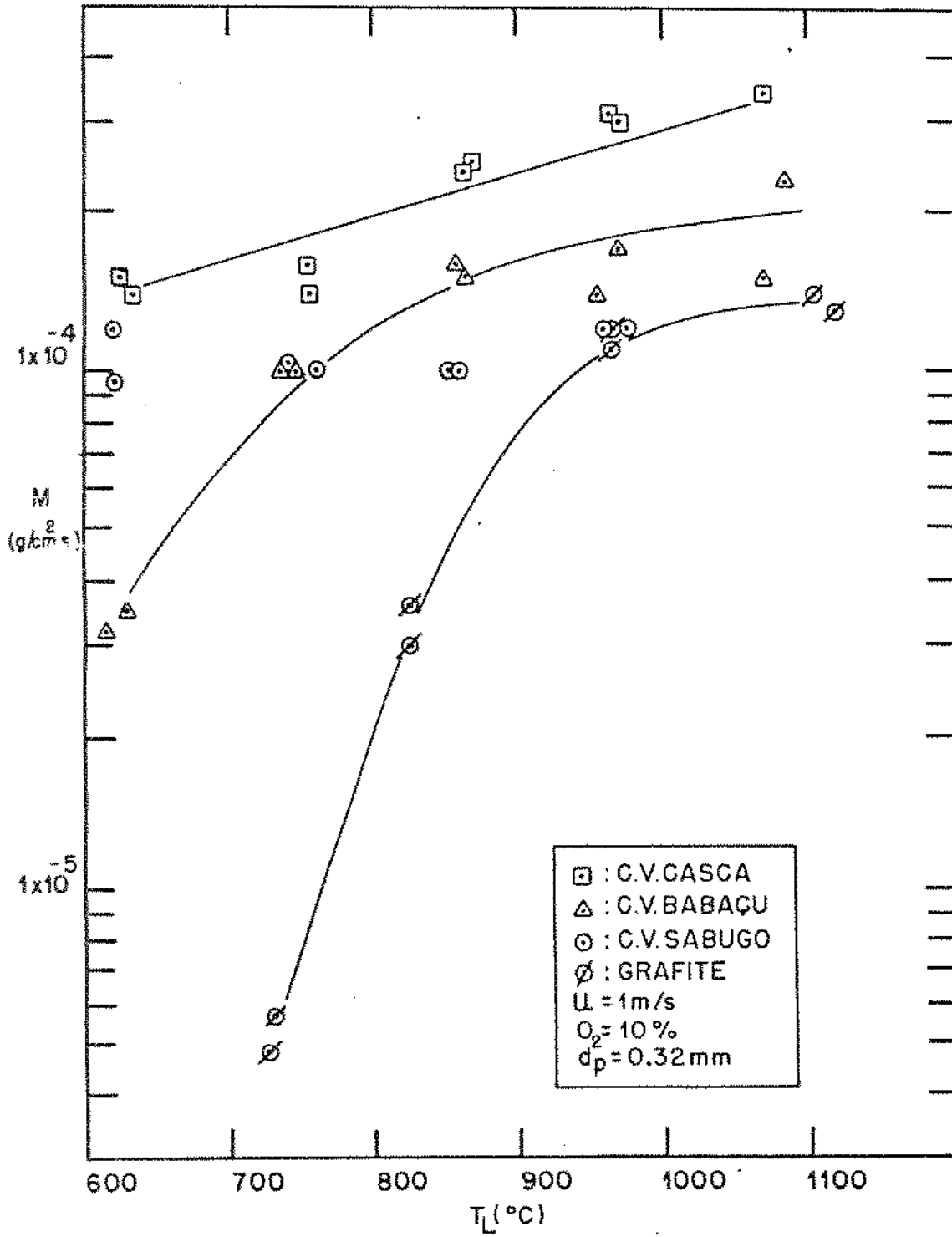


Figura 4.10- Gráfico da Taxa Específica de Queima em Função da Temperatura do Leito.

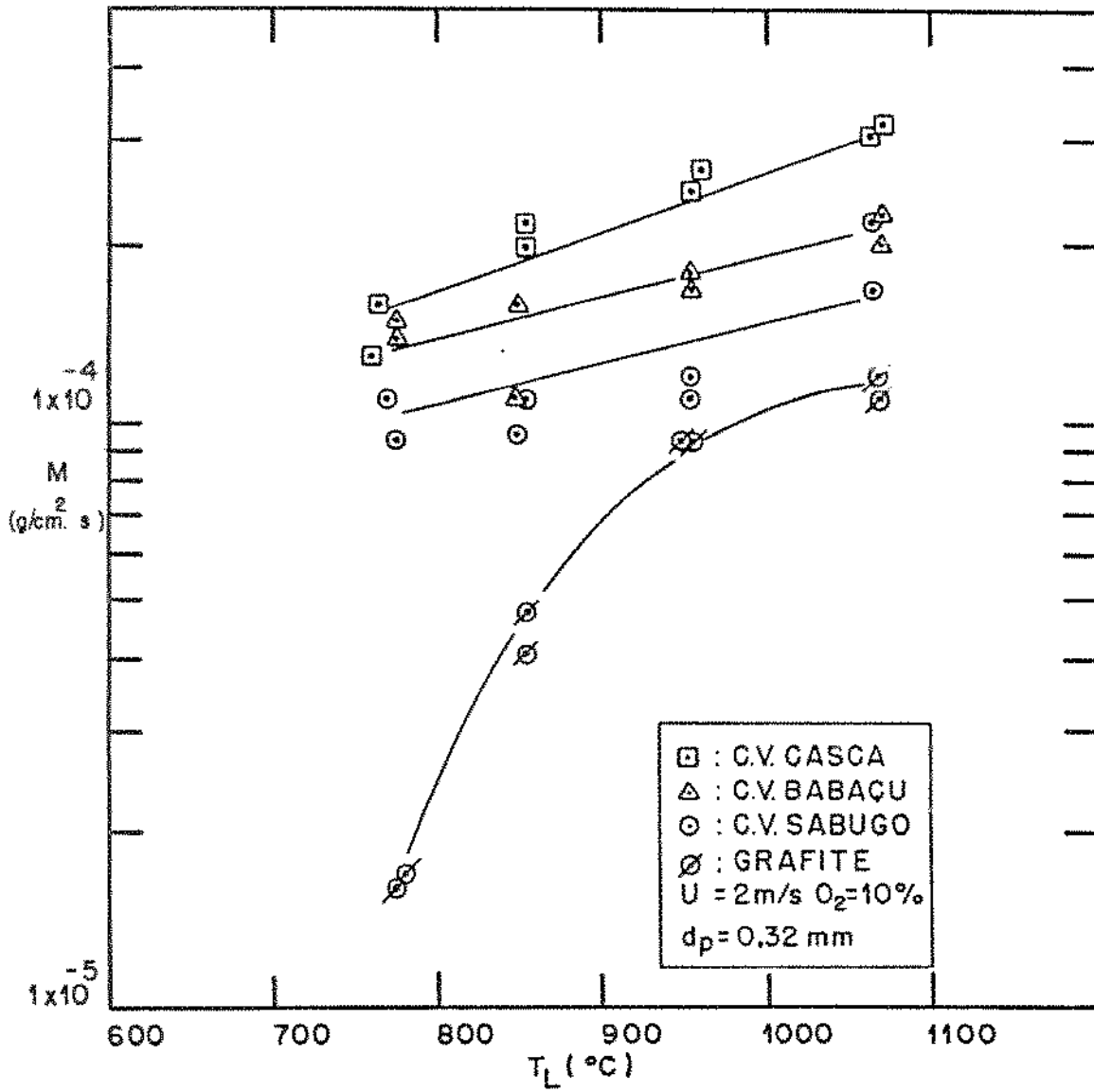


Figura 4.11- Gráfico da Taxa Específica de Queima em Função da Temperatura do Leito.

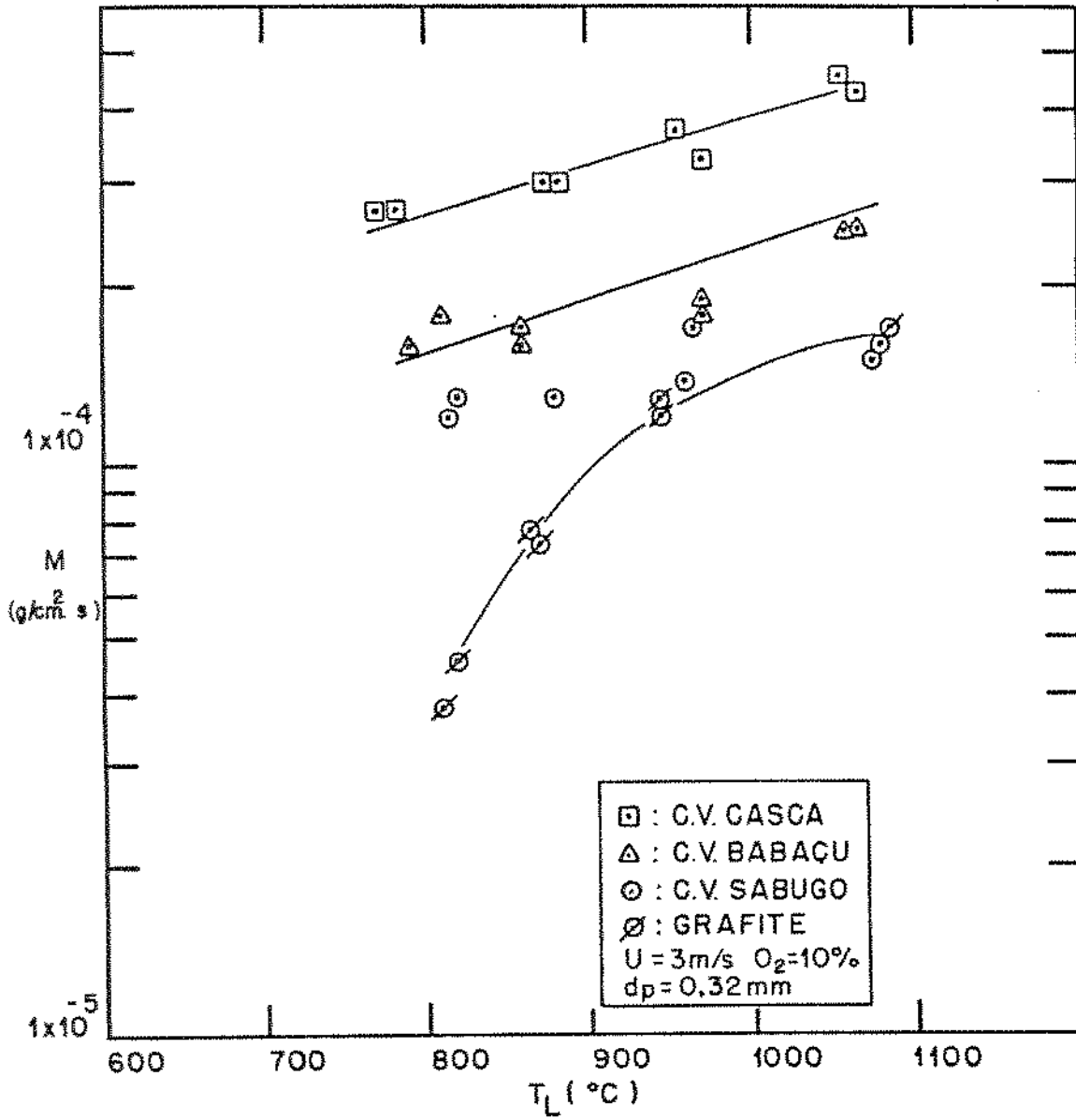


Figura 4.12- Gráfico da Taxa Específica de Queima em Função da Temperatura do Leito.

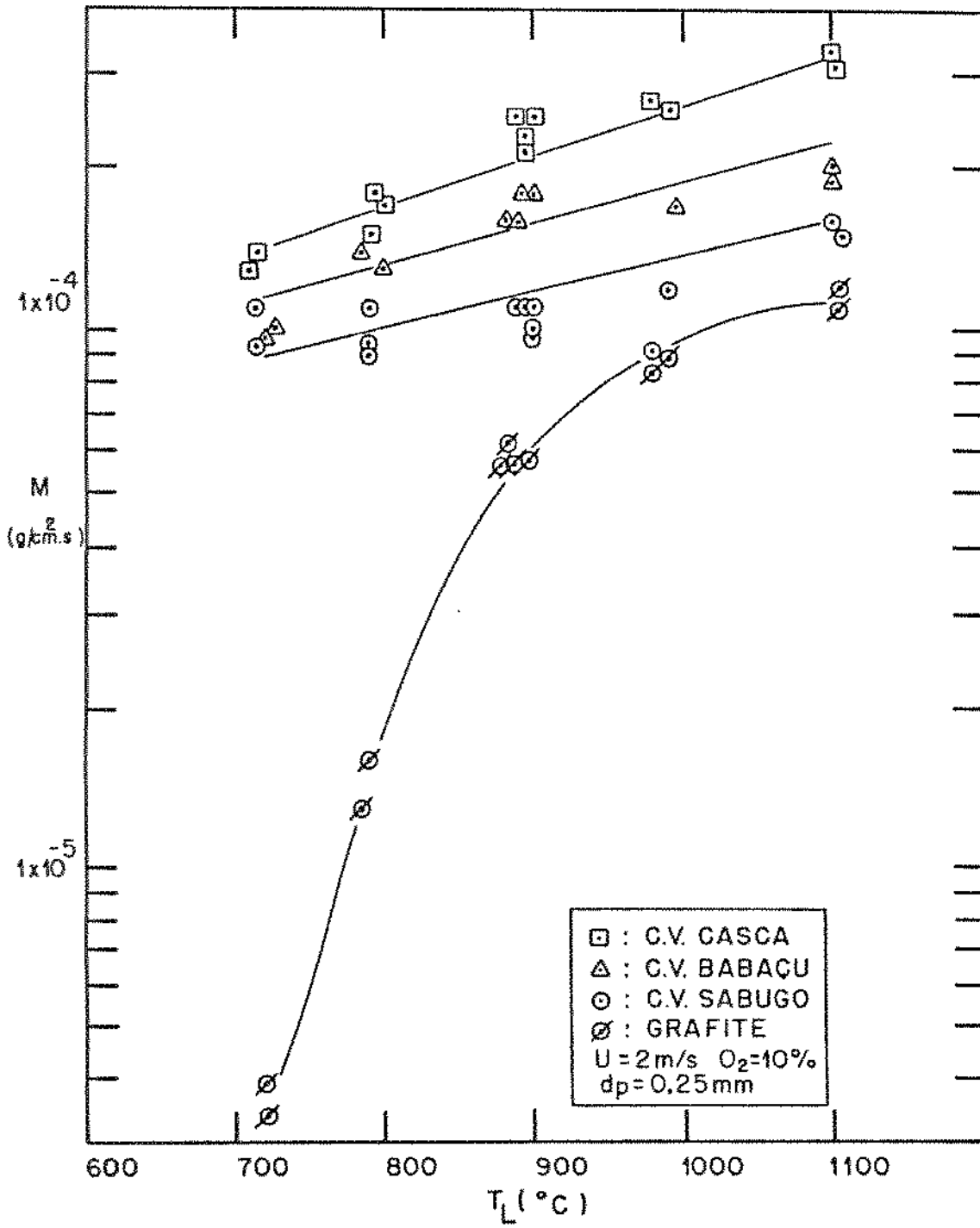


Figura 4.13- Gráfico da Taxa Específica de Queima em Função da Temperatura do Leito.

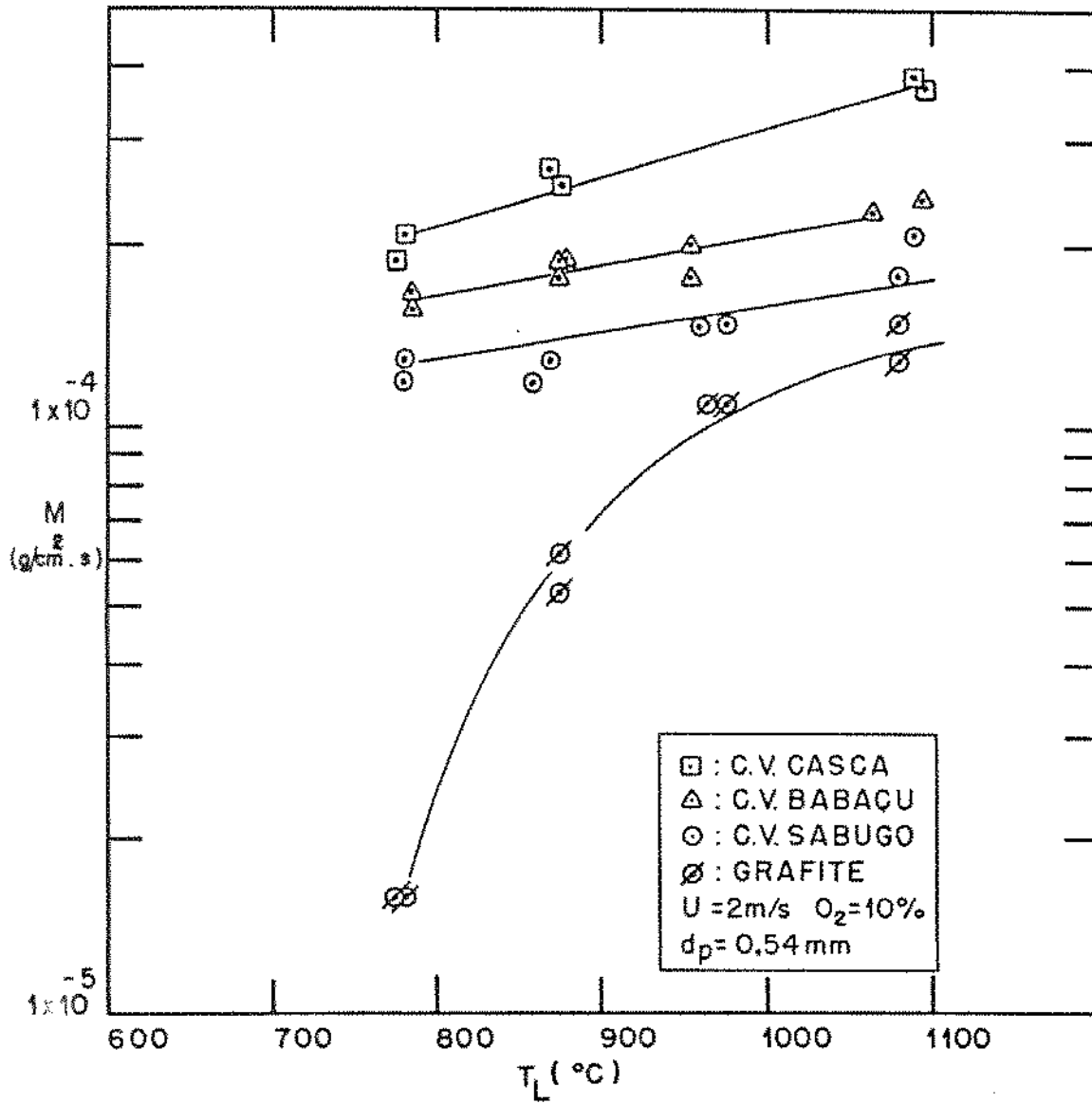


Figura 4.14- Gráfico da Taxa Específica de Queima em Função da Temperatura do Leito.

A análise desses resultados mostra que:

- A taxa de queima para os quatro combustíveis testados é crescente na seguinte ordem: grafite, C.V. Sabugo, C.V. Babaçu e C.V. Casca.

Para as amostras de grafite ocorre uma transição do controle cinético para o controle difusional da reação de queima a uma temperatura do leito de cerca de 1000°C . A mudança de controle cinético para o controle difusional de queima ocorre para os carvões vegetais a uma temperatura do leito em torno de 750°C (vide dados de C.V. Babaçu na Figura 4.10) e mesmo abaixo desta temperatura para os carvões vegetais de Casca e Sabugo.

Esses dados concordam com aqueles mostrados nas Figuras 4.4 e 4.5 para carvão vegetal de eucalipto e grafite, obtidos com leito de areia.

As Figuras 4.11, 4.13 e 4.14 mostram os resultados obtidos variando-se a granulometria dos inertes do leito: 0,32, 0,25 e 0,54 mm, respectivamente, mantendo-se a velocidade de fluidização em 2 m/s e o teor de oxigênio em 10%. Os mesmos dados são apresentados novamente nas Figuras 4.15 e 4.16 em separado para cada tipo de combustível.

A análise desses resultados mostra que, de uma maneira geral, os valores da taxa de queima são maiores para o leito de inertes com $d_p=0,54$ mm e mantêm-se praticamente indiferenciados quando obtidos em um leito com $d_p=0,25$ ou $d_p=0,32$ mm.

Os dados das Figuras 4.10, 4.11 e 4.12, foram obtidos para velocidades de fluidização de 1, 2 e 3 m/s, respectivamente, mantendo-se a mesma granulometria do leito ($d_p = 0,32$ mm). Nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 esses dados estão apresentados para cada

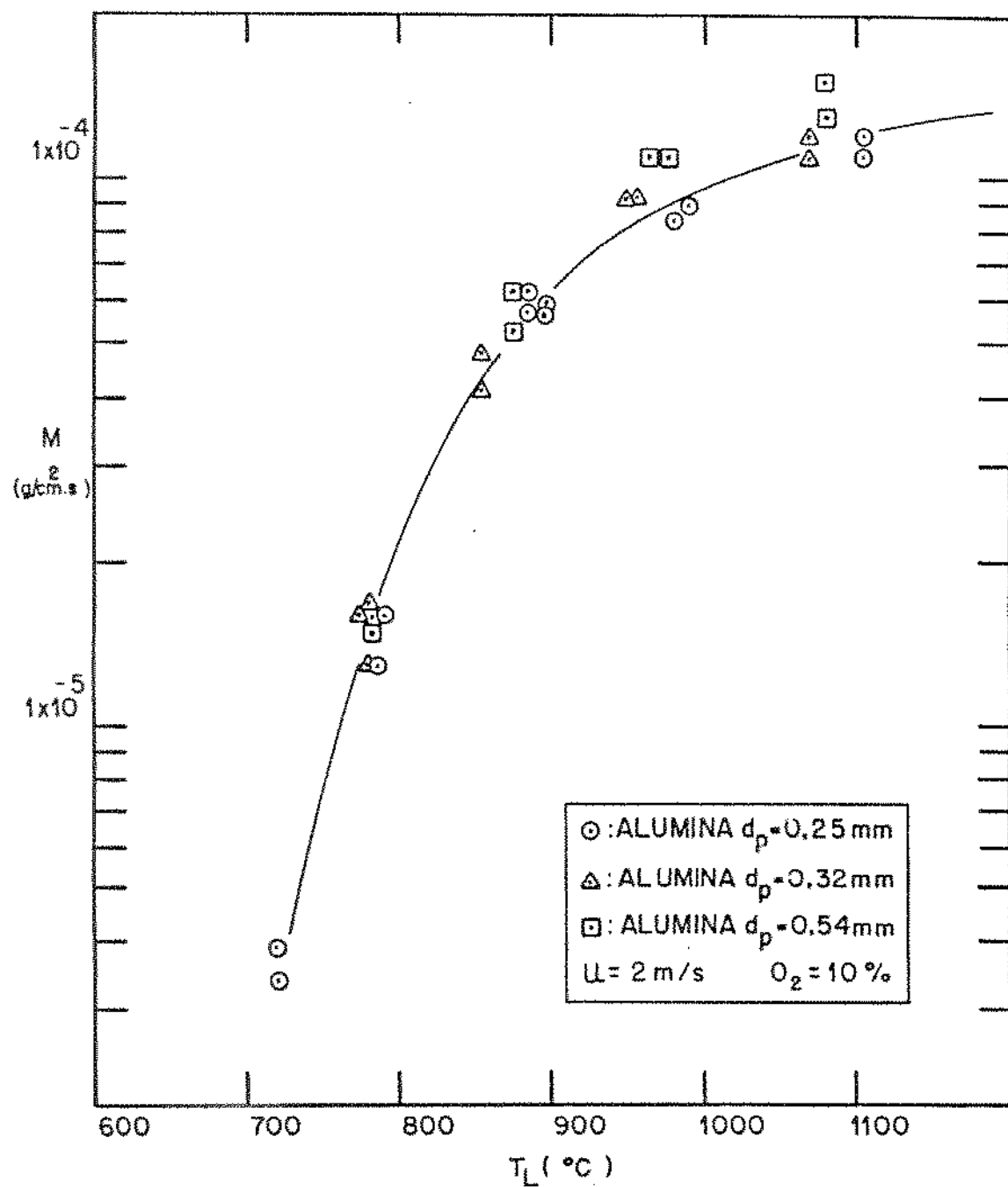


Figura 4.15- Efeito de Granulometria do Material do Leito Sobre a Taxa Específica de Queima M para Grafite.

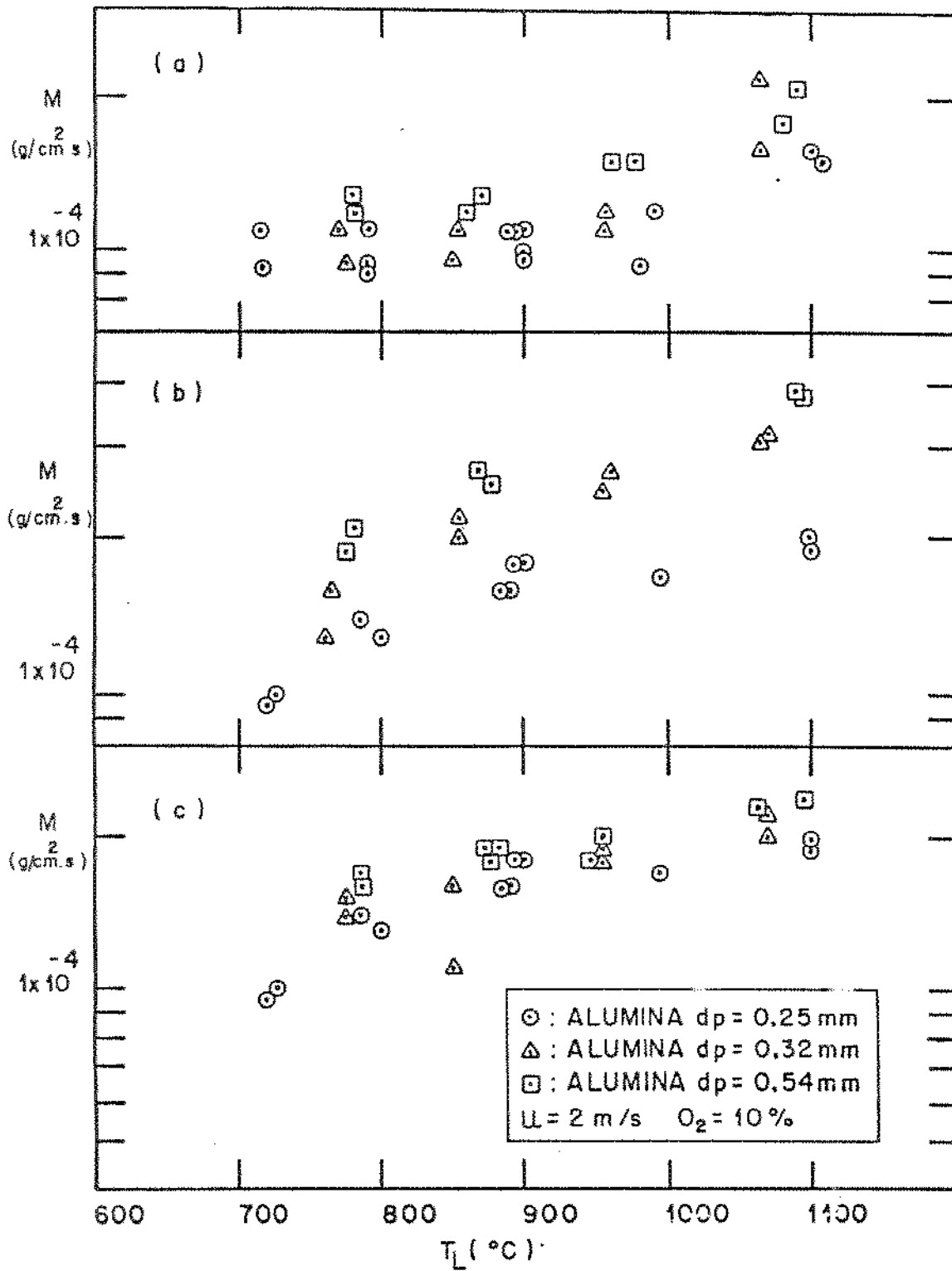


Figura 4.16- Efeito da Granulometria do Material do Leito Sobre a Taxa Específica de Queima (a) C.V. Sabugo (b) C.V. Cascas (c) C.V. Sabacu

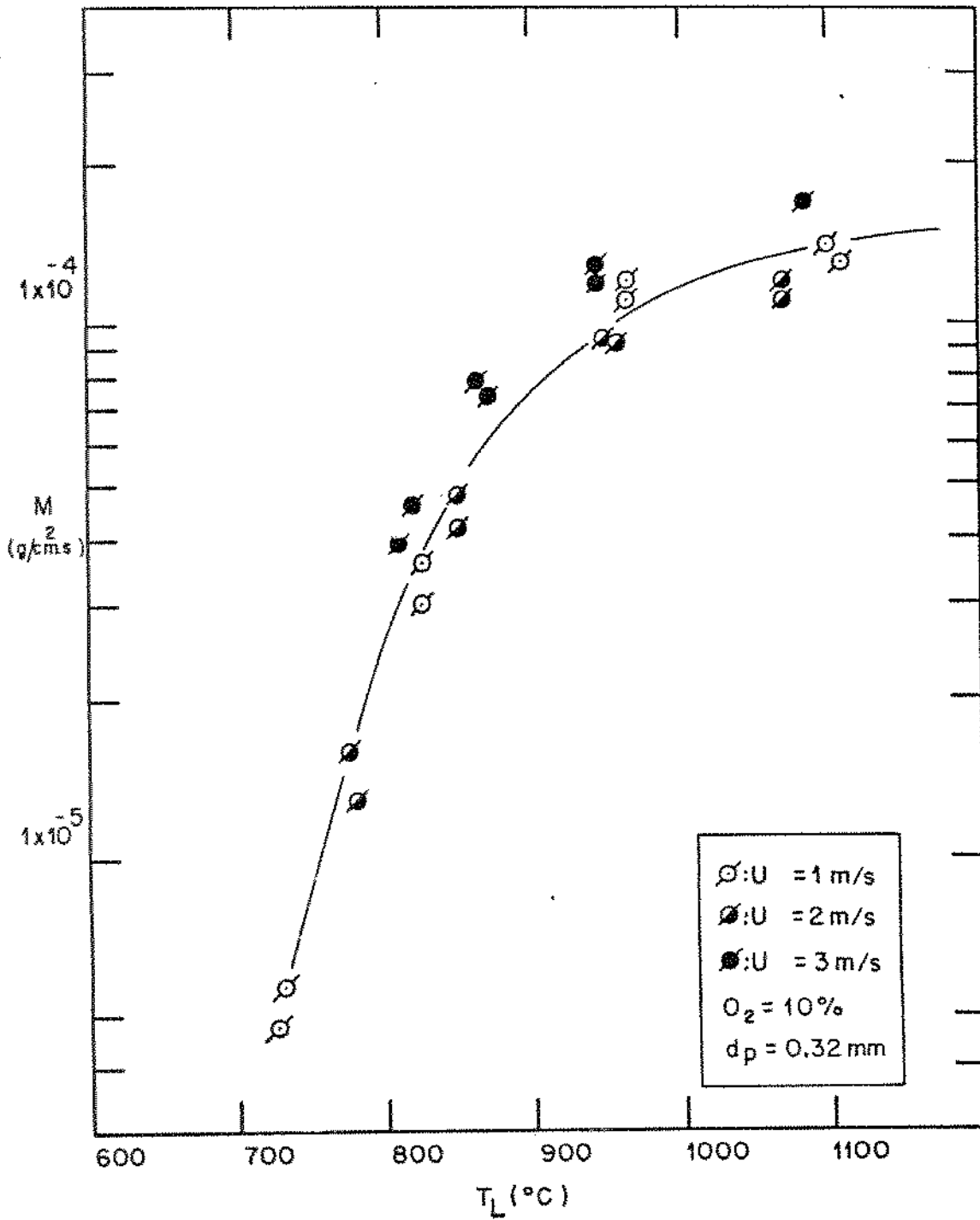


Figura 4.17- Efeito da Velocidade de Fluidização Sobre a Taxa Específica de Queima para Grafite.

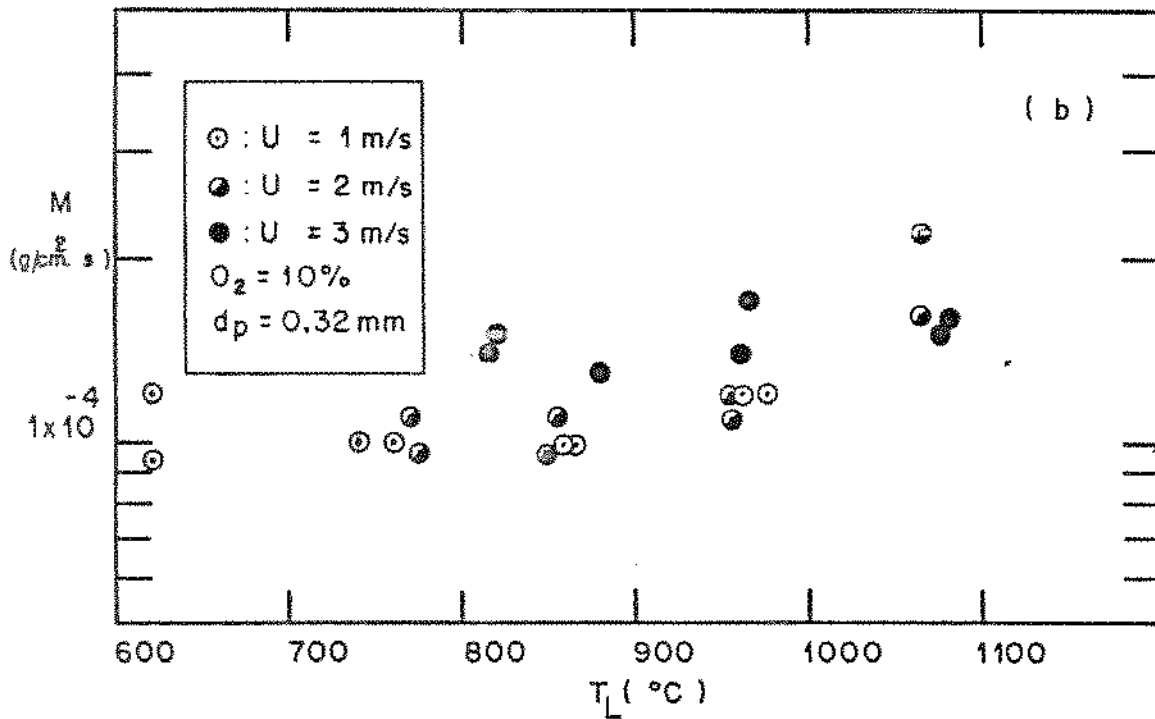
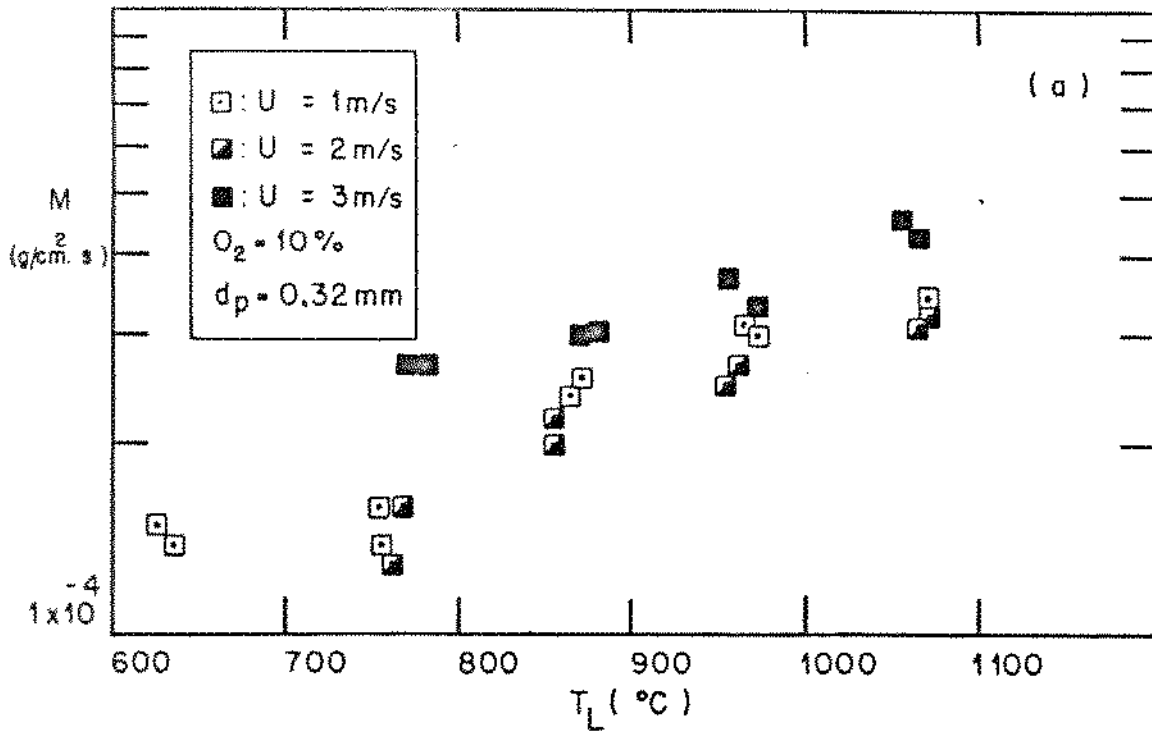


Figura 4.18- Efeito da Velocidade de Fluidização Sobre a Taxa Específica de Queima (a) C.V. Casca (b) C.V. Sabugo

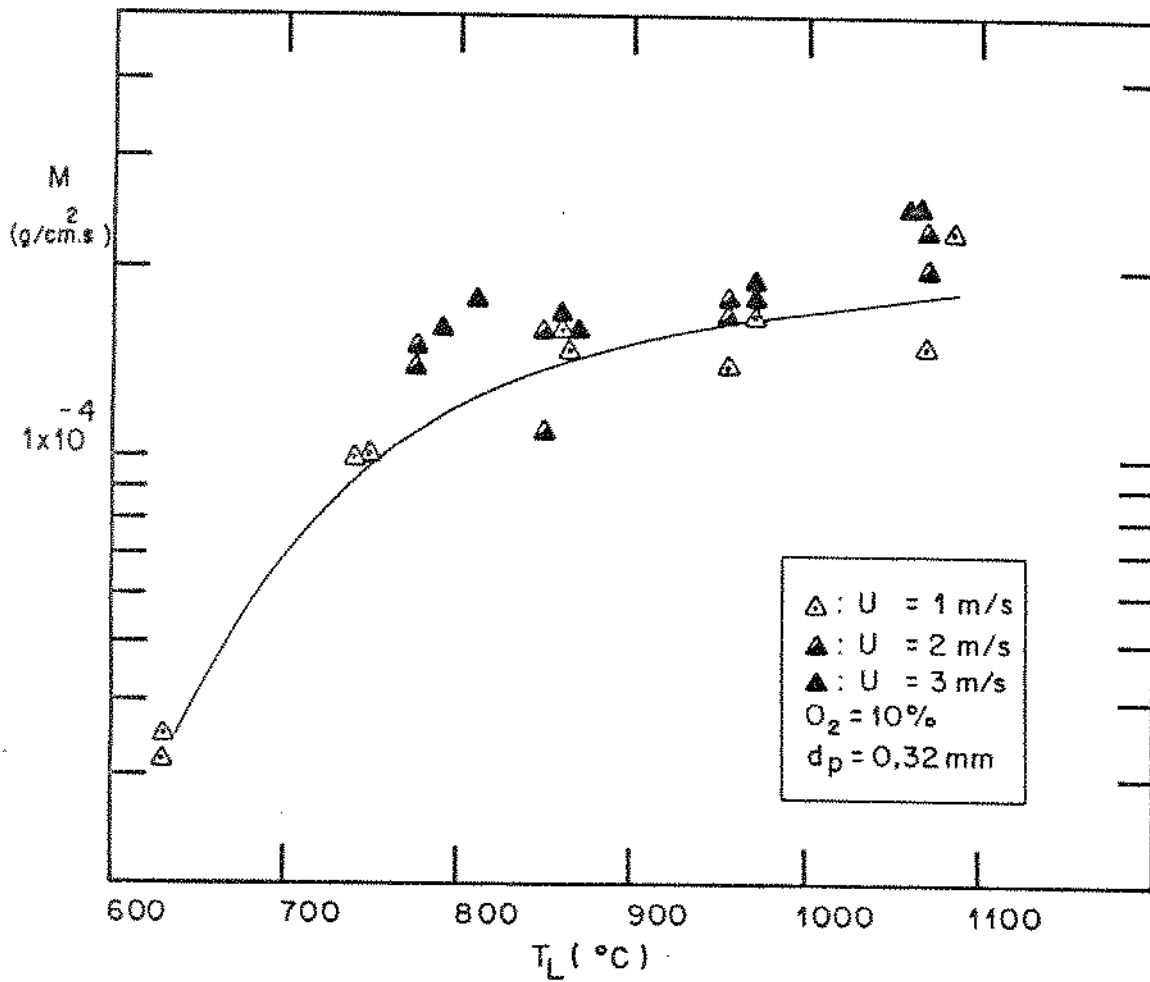


Figura 4.19- Efeito da Velocidade de Fluidização Sobre a Taxa Específica de Queima para C.V. Babaçu.

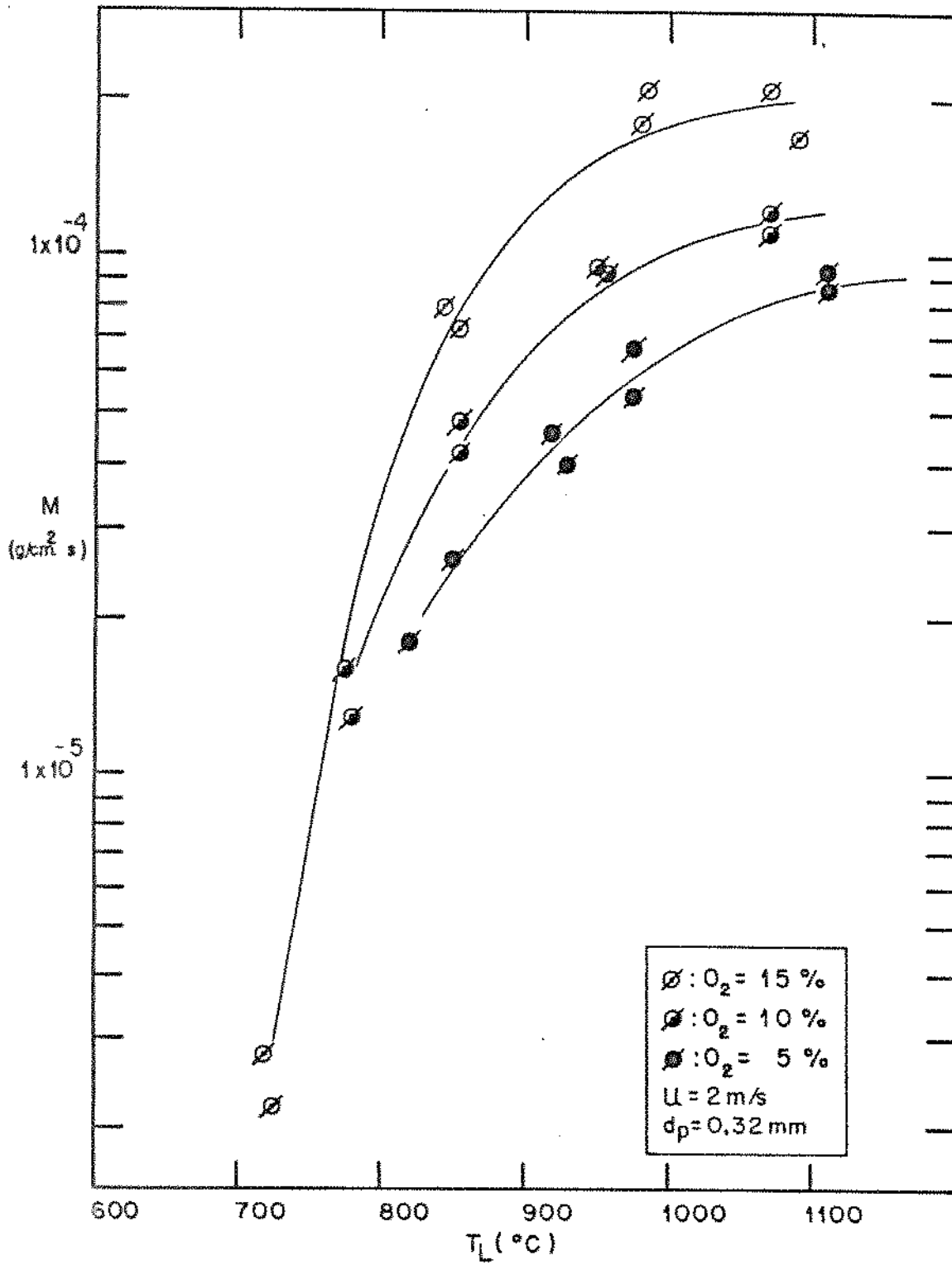


Figura 4.20- Efeito da Concentração de Oxigênio Sobre a Taxa de Queima para Grafite.

tipo de combustível de maneira a evidenciar o efeito da velocidade de fluidização na taxa específica de queima.

Verifica-se que a taxa de queima cresce com a velocidade de fluidização e apresenta os maiores valores para $U=3$ m/s: no entanto, o aumento de 1 para 2 m/s não provocou uma mudança significativa nos valores de M .

A Figura 4.20 (relativa a testes com grafite) mostra a variação da taxa específica de queima em função da concentração de oxigênio no gás de fluidização para várias temperaturas do leito. Pode-se ver de maneira clara, conforme esperado, a forte influência da concentração de oxigênio sobre os valores da taxa de queima.

Observa-se que a influência da concentração de O_2 diminui para as temperaturas mais baixas e que a convergência das curvas de M para valores de temperatura menores do que $800^{\circ}C$, é coerente com o controle cinético da reação, no qual os valores da taxa de queima são função da temperatura e não da concentração de oxigênio. Para carvões vegetais a temperatura na qual a concentração de oxigênio apresenta menor influência sobre as taxas de queima deve estar por volta de $550^{\circ}C$.

Uma análise da Tabela 4.1, mostra que os combustíveis apresentam uma grande variação no conteúdo de cinzas, o que pode mascarar os valores da taxa específica de queima quando a perda de massa inclui uma parte devido às cinzas.

Para corrigir eventuais distorções dos dados devido aos diferentes teores de cinza definiu-se uma nova taxa específica de queima tal que:

$$M_1 = \frac{DM}{Ag} \cdot \frac{(1-Z)}{t_r} \quad \text{ou} \quad M_1 = M \cdot (1-Z) \quad (4.3)$$

onde:

DM = Perda de massa da amostra durante o tempo de residência no leito (g);

Ag = Área geométrica superficial inicial da amostra (cm²);

tr = Tempo de residência da amostra no leito (s), e

Z = Teor de cinzas do combustível.

Os resultados calculados a partir da equação (4.3) são apresentados nas Figuras 4.21 a 4.25, e devem ser comparados com aqueles apresentados anteriormente nas Figuras 4.10 a 4.14, respectivamente.

Nota-se que diminui a diferença entre os valores da taxa de queima dos carvões vegetais e, à medida que aumenta a temperatura do leito, também os valores de M_1 para a grafite se aproximam daqueles para os carvões vegetais.

Assim, por exemplo, para temperatura do leito próxima de 1100°C na Figura 4.10 o valor de M para a grafite difere em cerca de 62% do valor de M para C.V. Casca. Na Figura 4.21, para os mesmos pontos, o valor de M_1 para grafite difere apenas em 53% do valor de M_1 para o C.V.Casca. Nas mesmas figuras a comparação entre os valores de M e M_1 para os carvões vegetais de casca e de babaçu à temperatura de 860°C, quando a queima também ocorre com controle difusional, mostra que M do C.V.Babaçu difere cerca de 36% da M para C.V.Casca, enquanto que para a mesma temperatura, M_1 do C.V.Babaçu difere em apenas 25% do valor para C.V.Casca.

Comparando-se os outros gráficos da M e M_1 (Figuras 4.11 e 4.22, ..., 4.14 e 4.25) verifica-se a mesma aproximação relativa

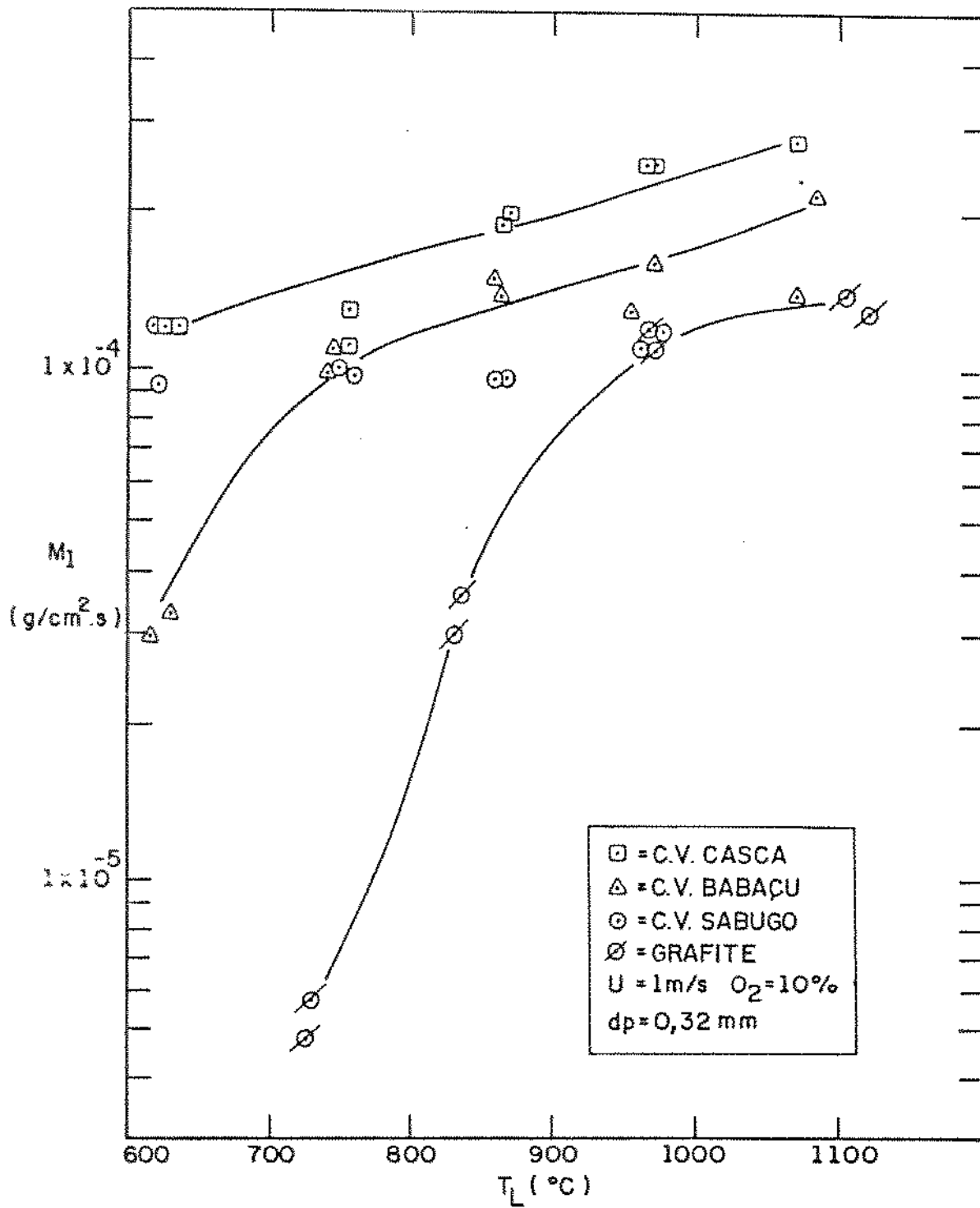


Figura 4.21- Gráfico da Taxa Específica de Queima em Função da Temperatura do Leito. $U = 1 \text{ m/s}$

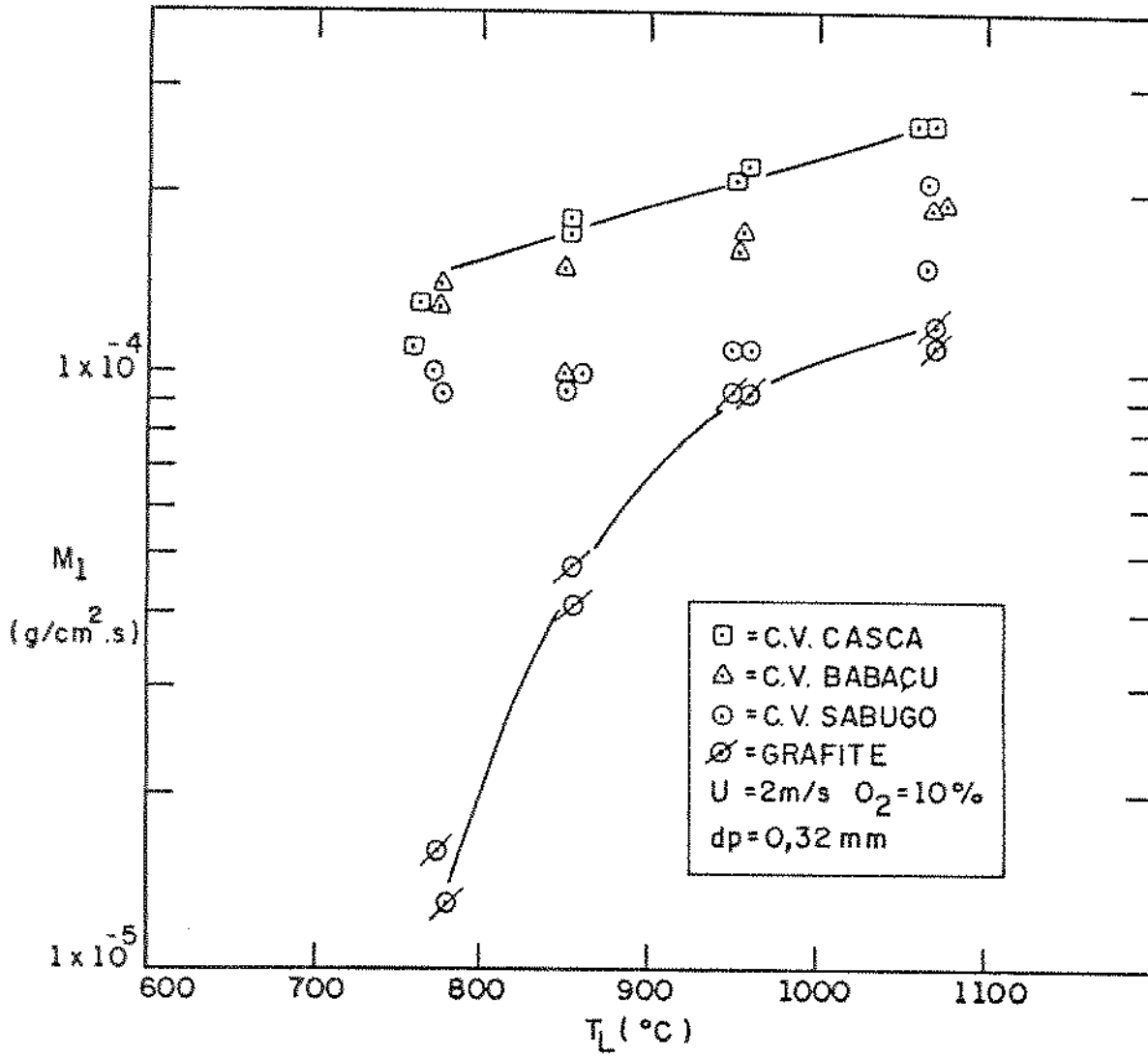


Figura 4.22- Gráfico da Taxa Específica de Queima em Função da Temperatura do Leito. $U = 2 \text{ m/s}$

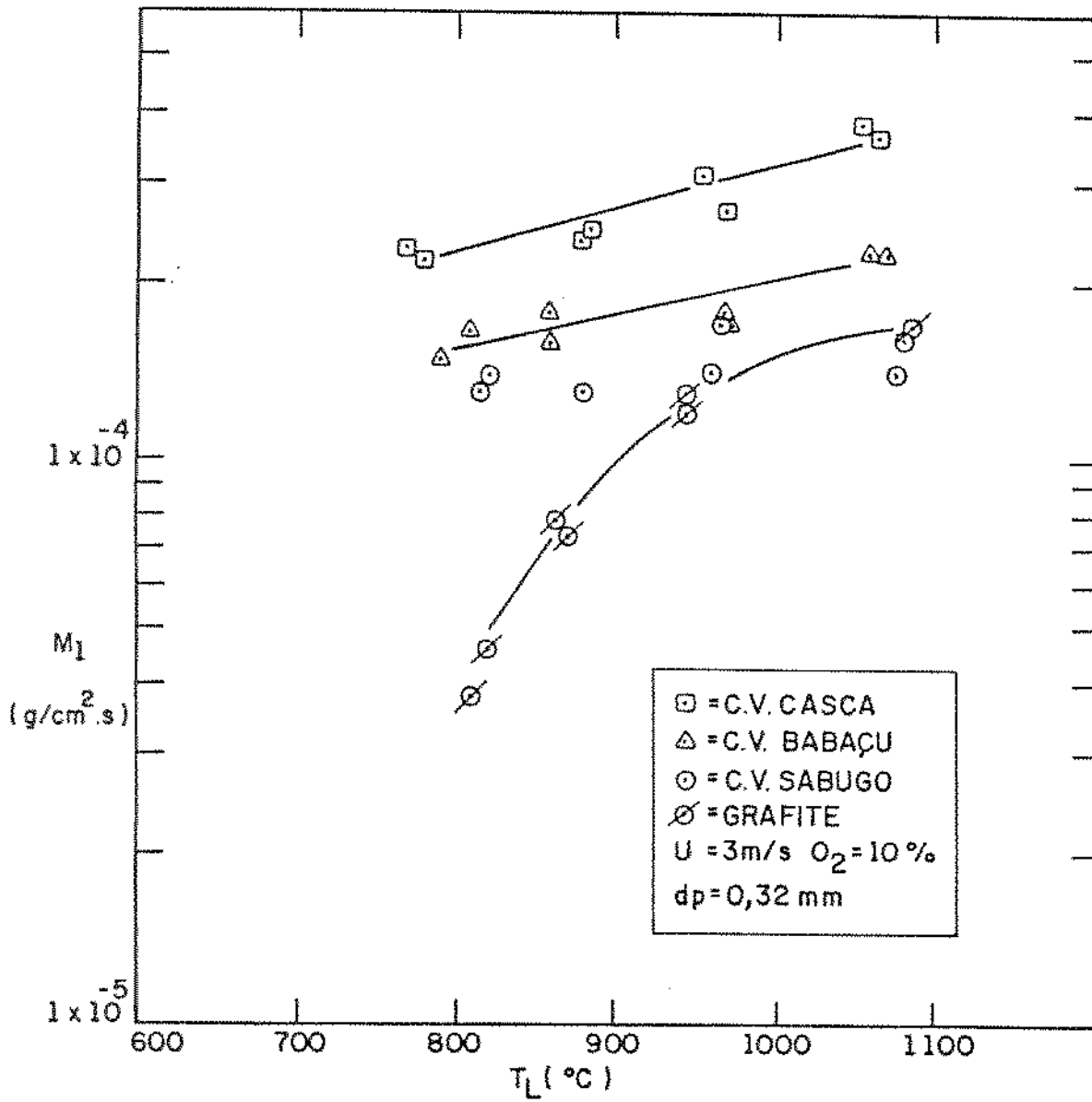


Figura 4.23- Gráfico da Taxa Específica de Queima em Função da Temperatura do Leito. $U = 3 \text{ m/s}$

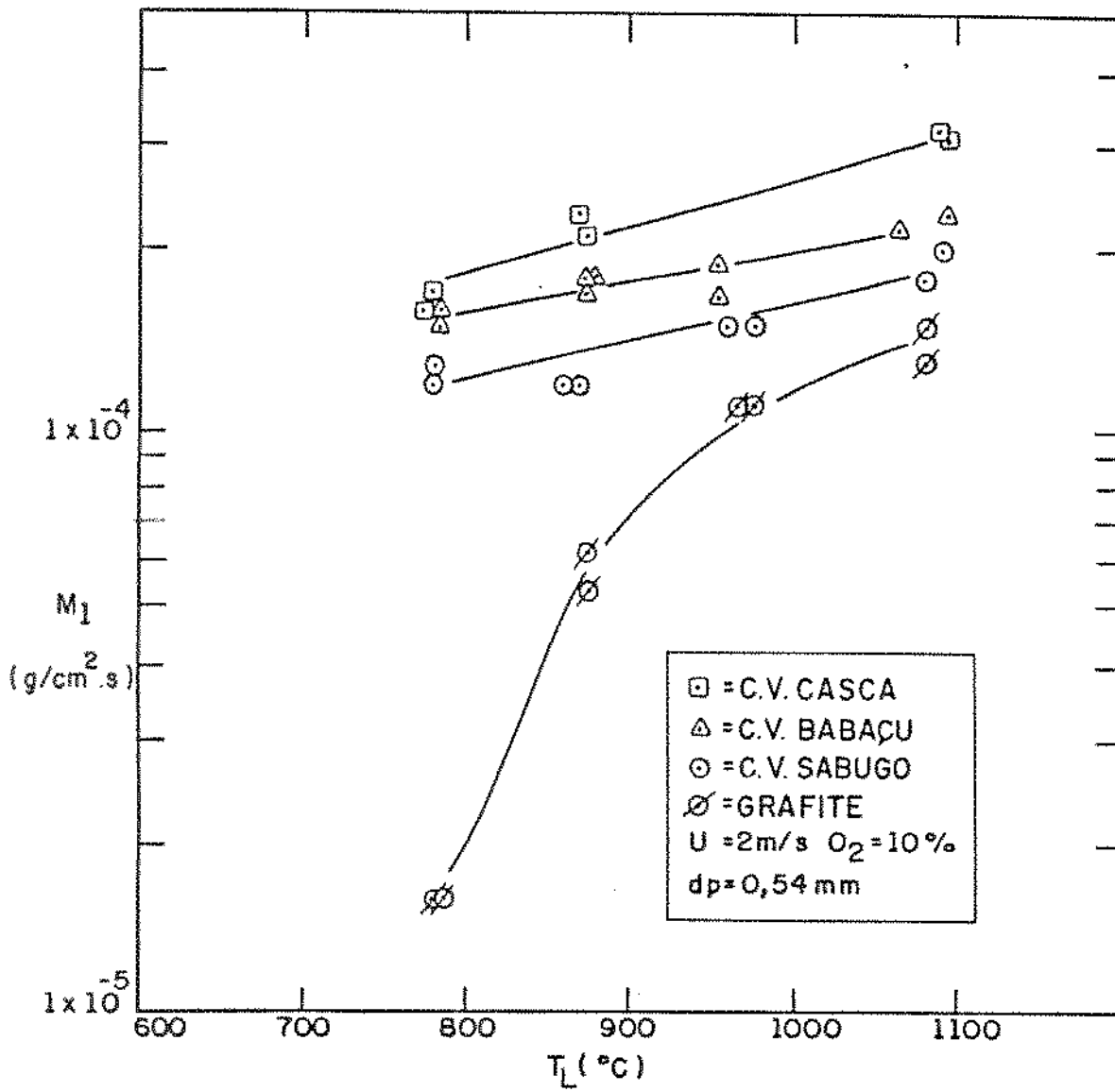


Figura 4.24- Gráfico da Taxa Específica de Queima em Função da Temperatura do Leito. $d_p = 0,54 \text{ mm}$

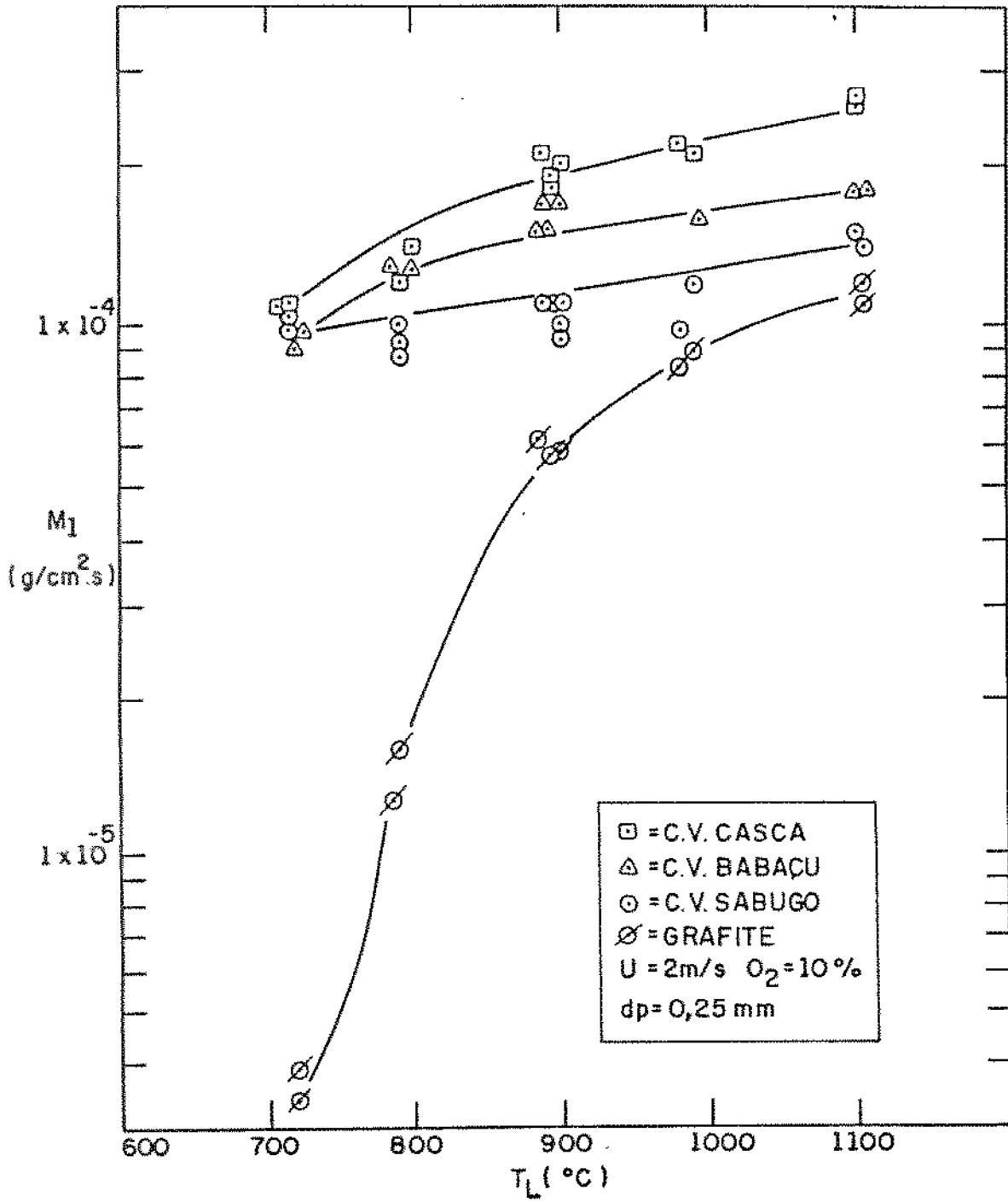


Figura 4.25- Gráfico da Taxa Específica de Queima em Função da Temperatura do Leito. $d_p = 0,25$ mm

entre os valores de M_1 para os combustíveis testados.

Esperava-se, no entanto, que no regime do controle difusional (grafite acima de 1000°C e carvões vegetais acima de 750°C) os valores da taxa de queima convergissem para um mesmo valor, e foi para exprimir este fato que se corrigiu a expressão da taxa de queima. Devido ao fato de persistirem valores diferentes da taxa de queima M_1 para os diferentes combustíveis, poder-se-ia argumentar que o regime de controle difusional não foi plenamente atingido. A análise da Figura 4.26, no entanto, confirma que este regime foi efetivamente atingido.

A Figura 4.26 apresenta as curvas dos valores do coeficiente de difusão em nitrogênio para os gases CO_2 , CO e O_2 , no intervalo de temperatura em que os experimentos foram realizados.

Pode-se notar que a inclinação das curvas dos coeficientes de difusão é praticamente a mesma daquelas das taxas de queima M e M_1 , após a mudança do controle cinético para difusional da reação. Essa semelhança é indicativa do controle difusional da reação e é mais facilmente percebida com a superposição de uma transparência das curvas de difusão sobre os gráficos das taxas M e M_1 .

O fato das curvas da taxa de queima dos diferentes combustíveis não tenderem para um mesmo valor, o que é característico do controle difusional, pode ser atribuído à forma de cálculo da taxa específica de queima segundo as equações (4.2) e (4.3), que não levam em consideração fatores como a área específica dos combustíveis e a profundidade de penetração do oxigênio na estrutura de poros das amostras, que presumivelmente tenderiam a agrupar os resultados.

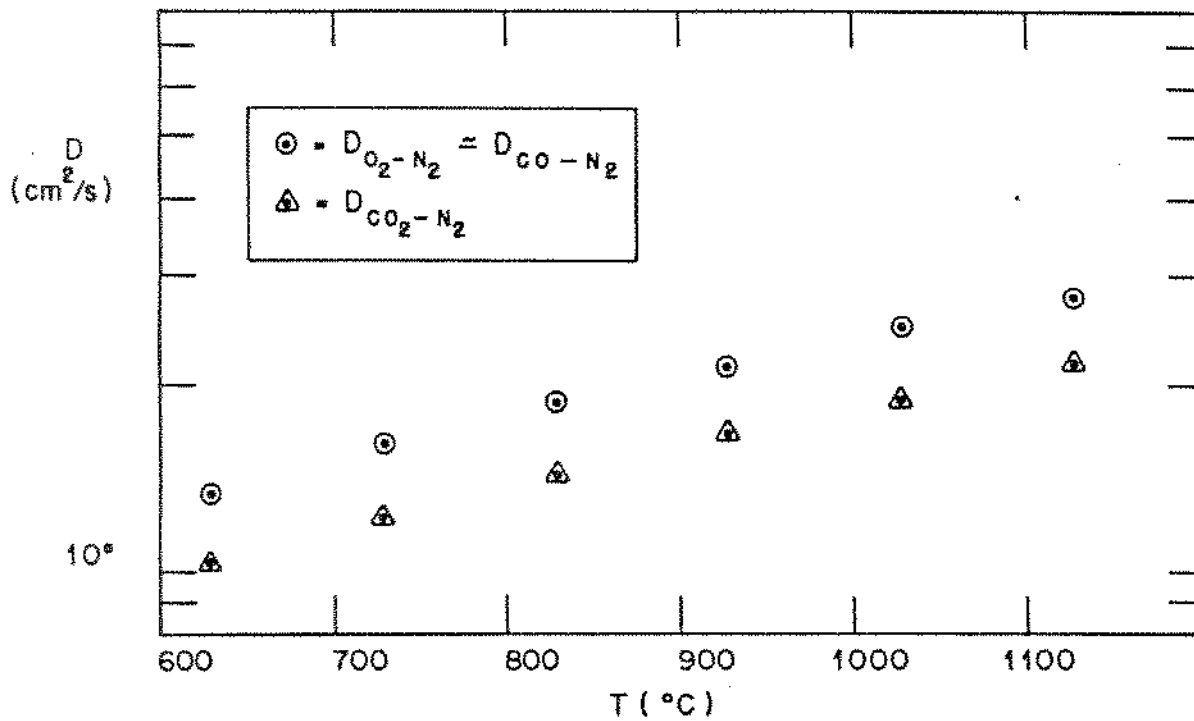


Figura 4.26- Coeficientes de Difusão em Função da Temperatura. (Field, Gill, Morgan e Hawksley-1967)

Outras definições da taxa de queima foram elaboradas na tentativa de melhor descrever o processo. A equação (4.4) abaixo é uma expressão para a taxa de queima usando a área específica do combustível.

$$M_2 = \frac{DM}{(M_i \cdot A_e) t_r} \quad (4.4)$$

onde:

M_i = massa inicial da amostra de combustível (g), e

A_e = área específica do combustível (cm²/g)

O uso do produto $M_i A_e$ no denominador da equação expressa o conceito de que toda a superfície relativa aos microporos do combustível estaria disponível para a reação de oxidação, numa queima volumétrica com diminuição de densidade do combustível no processo, enquanto o volume permanece praticamente constante.

A Figura 4.27 apresenta os valores da taxa de queima calculados segundo M_2 . Nota-se que, próximo de 1000°C, o C.V. Babaçu e a grafite apresentam os mesmos valores de M_2 , enquanto os combustíveis

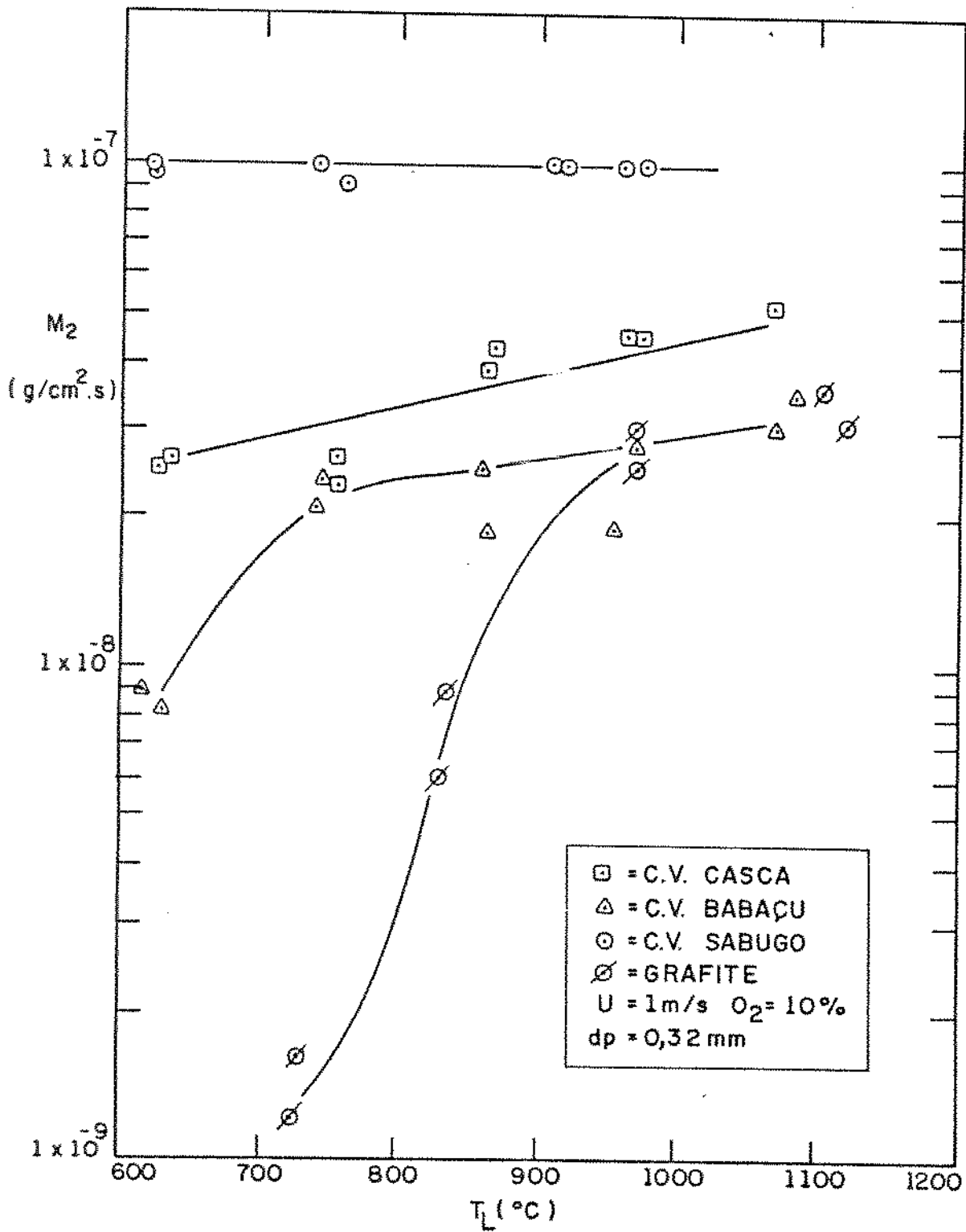


Figura 4.27- Gráfico da Taxa Específica de Queima M_2 em Função da Temperatura do Leito.

tíveis mais porosos (C.V.Casca e C.V.Babaçu) apresentam valores distintos, indicando que devem ocorrer diferentes profundidades de penetração do oxigênio no volume dos combustíveis.

A equação (4.5), por sua vez corresponde à tentativa de representar que a área realmente disponível para a reação de queima é proporcional à área específica e também à porosidade do combustível, enquanto o uso da área geométrica superficial da amostra, além de adequar dimensionalmente o cálculo, representa a influência do tamanho da amostra na perda de massa:

$$M_3 = \frac{DM (1 - Z)}{(M_1 A_e A_g) 172 P \cdot \bar{\epsilon}_r} \quad (4.5)$$

P é a porosidade do combustível e representaria a profundidade de penetração de oxigênio na amostra.

Os resultados de M_3 estão graficados na Figura 4.28, correspondendo às mesmas condições representadas nas Figuras 4.10, 4.21 e 4.27. Observa-se o agrupamento dos resultados relativos aos carvões vegetais, indicando que para estes combustíveis no regime de controle difusional a relação acima é uma boa aproximação. No entanto, o fato da equação (4.5) não agrupar os resultados da grafite, sugere que ela necessita ser aperfeiçoada ainda mais para descrever de maneira adequada a área efetivamente exposta à reação de queima.

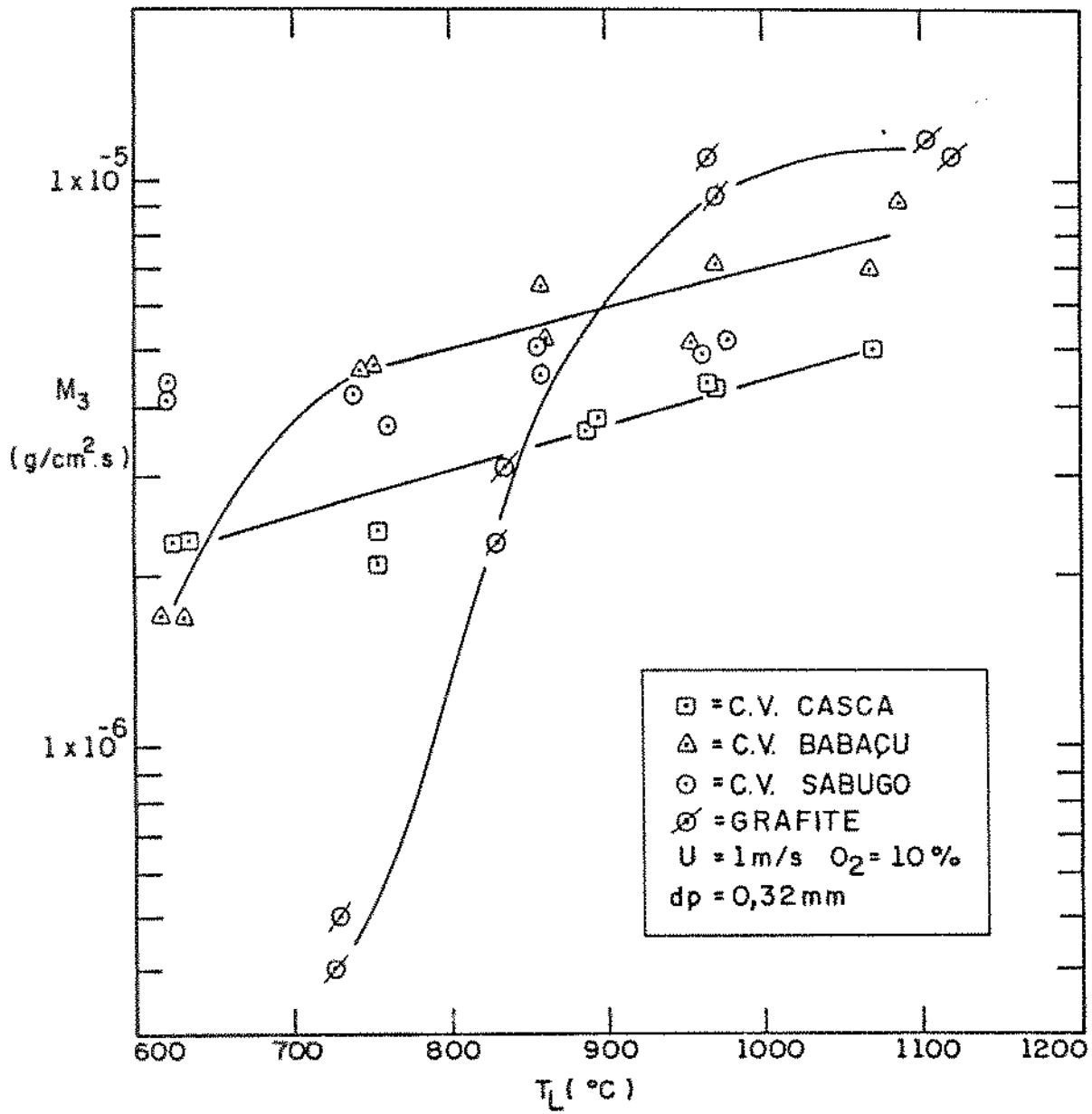


Figura 4.28- Gráfico da Taxa Específica de Queima M_3 em Função da Temperatura do Leito.

1) Efeito do Tamanho das Amostras e da Porosidade na Taxa de Queima.

Testes foram realizados nas condições descritas na Tabela 4.2 abaixo.

Tabela 4.2: Condições de Operação do Leito

Material Inerte :	areia com $0,25 < d_p < 0,30$ mm
Massa dos inertes :	cerca de 550 g
Altura estática do leito :	6 cm
Vazão do gás de fluidização :	$10 \text{ m}^3/\text{h}$
U (750°C) :	2 m/s
Tempo de residência da amostra :	180 s
Concentração de O_2 :	10%
Temperatura do leito = 750°C	

Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 4.3, mostram uma diferença significativa de porosidade entre os três combustíveis testados: cerca de 20% de porosidade em volume para a grafite, enquanto os carvões de sabugo e de eucalipto apresentam valores da ordem de 80%.

Tabela 4.3: Taxa de Queima em Função da Porosidade

Combustível	Grafite	Carvão de Eucaliptus	Carvão de sabugo
Porosidade (% volume)	cerca de 20%	cerca de 70%	cerca de 80%
Taxa de queima ($\text{g}/\text{cm}^2.\text{s}$)	$9,2 \times 10^{-6}$	140×10^{-6}	95×10^{-6}

Os valores obtidos para a taxa de queima mostram uma grande diferença entre a grafite e os carvões vegetais. Observando-se os dados relativos aos carvões vegetais verifica-se que os valo-

res da taxa de queima são superiores para o carvão de eucalipto, mostrando que a macroporosidade dos sabugos tem menor influência sobre a taxa de queima do que o esperado.

O efeito do tamanho da amostra pode ser observado na Tabela 4.4, através do aumento da conversão DM/M_i com a relação A_g/M_i . Os dados mostram que se pode conseguir maiores taxas de geração de calor queimando combustíveis com menor granulometria.

Verifica-se na Figura 4.29, que a perda da massa aumenta com a área da superfície externa da amostra de combustível. O gráfico sugere uma relação linear entre a perda de massa e a área geométrica das amostras.

Tabela 4.4: Valores de Conversão Percentual para Razão Área Geométrica/Massa

Grafite			
A_g/M_i (cm^2/g)	4,2	3,2	2,4
DM/M_i (%)	0,70	0,60	0,40
Carvão de Eucalipto			
A_g/M_i (cm^2/g)	13,8	11,7	10,6
DM/M_i (%)	38,5	27	22
Carvão de Sabugo			
A_g/M_i (cm^2/g)	28,5	21,5	17
DM/M_i (%)	47	39,5	29

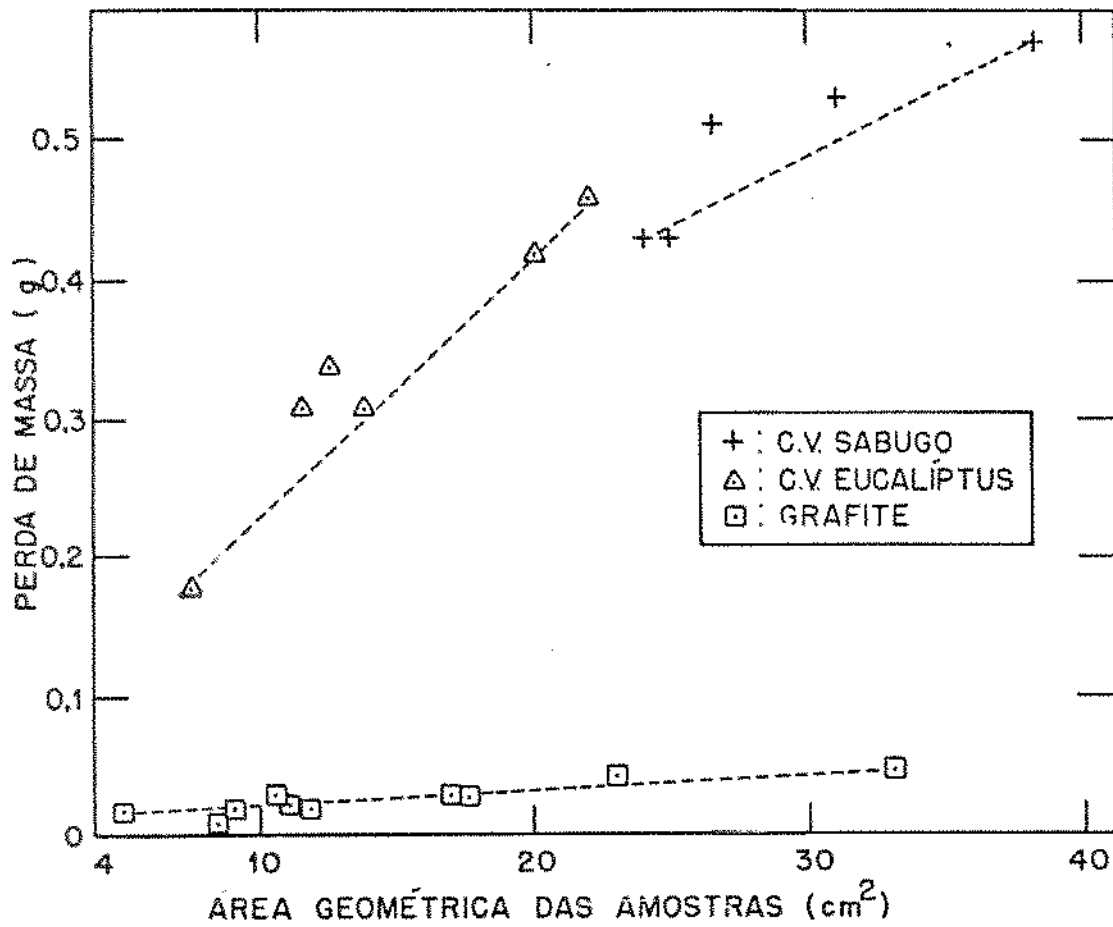


Figura 4.29: Perda de Massa em função da Área Superficial Externa. $T_L = 750^{\circ}\text{C}$ e $t_p = 3$ min.

A análise da Tabela 4.4 e da Figura 4.29 confirma que se pode conseguir maiores taxas de geração de calor queimando-se combustível com menor granulometria.

A Figura 4.30 mostra o tempo para a combustão completa em função da massa de amostras. Os valores para a grafite são cerca de 4 vezes maior do que para a C.V. Eucalipto e cerca de 7 vezes maior do que para o C.V. Sabugo.

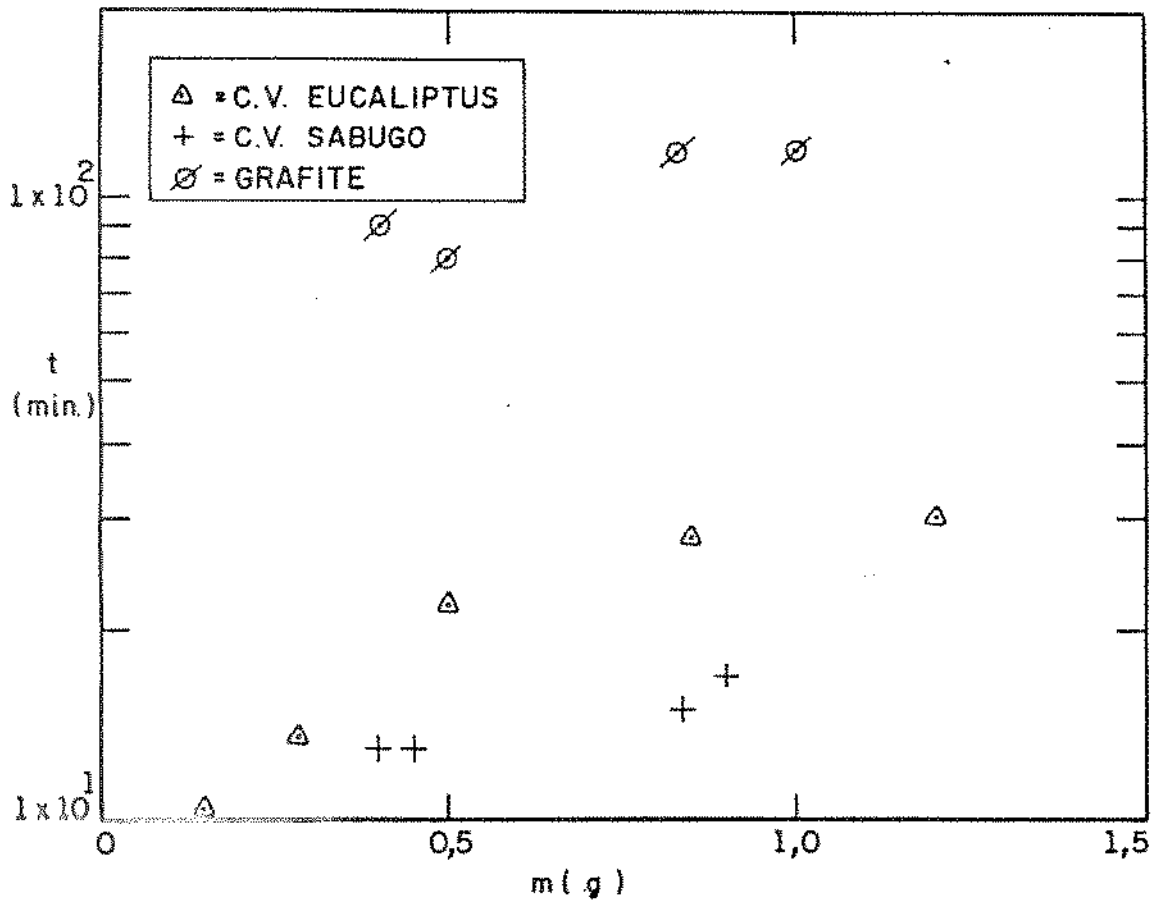


Figura 4.30: Tempo para a Combustão Completa em Função da Massa de Amostra. $T_L = 750^\circ\text{C}$, $O_2 = 10\%$.

As diferenças na taxa de queima apresentadas na Tabela 4.3, e no tempo para combustão completa (função da taxa de queima) das amostras testadas parecem indicar que nas condições de teste, com $T_L = 750^\circ\text{C}$, as amostras queimadas se comportam de acordo com a condição da região B da Figura 1.12 e, à medida que se diminui a porosidade, a reação de combustão muda na direção de uma reação volumétrica no caso dos carvões vegetais para uma reação superficial no caso da grafite.

Considerando-se as condições de operação de um leito fluidizado borbulhante, os resultados obtidos permitem concluir que, para uma mesma potência térmica liberada no leito a concentração necessária de combustível no leito aumenta com o tamanho de amostra e com a diminuição da porosidade do combustível.

A otimização da operação de um queimador com leito fluidizado borbulhante, deve ser determinada para cada caso em função das propriedades do combustível disponível.

ii) Efeito da Forma da Amostra de Combustível Sobre a Taxa de Queima em um Leito Fluidizado Borbulhante.

Tradicionalmente os estudos da combustão em leito fluidizado tem sido realizados com a utilização de partículas esféricas de coque e carvão mineral. Esse procedimento foi adotado, provavelmente, devido ao fato de já existir toda a modelagem matemática desenvolvida no estudo da combustão pulverizada de carvão mineral descrita, por exemplo, em Field, Gill, Morgan e Hawksley (1967), e em Mulcahy e Smith (1969), onde as pequenas partículas de combustível são estudadas como esferas de carbono.

Para se analisar um possível efeito da forma sobre a taxa de queima, pode-se iniciar pelo conceito da equivalência formal ou analogia entre a transferência de calor e a transferência de massa para corpos imersos em um escoamento de gás.

Nos estudos de transferência de calor adota-se o uso de um número adimensional, calculado a partir das propriedades e características físicas do fluido e do corpo imerso no escoamento. As propriedades consideradas são: velocidade do gás, viscosidade,

difusividade, condutividade térmica e densidade do gás, bem como dimensões do corpo imerso, sua forma etc...O efeito da forma na transferência de calor é então analisado pelo uso de placas planas, tubos cilíndricos, esferas etc...

Em todos os casos, em função do escoamento do gás, ocorre a formação de uma camada limite cuja espessura (δ) irá limitar a transferência de calor através da difusão das moléculas dentro do seu volume.

O aumento da velocidade do gás, diminui a espessura da camada limite e, portanto, diminui a resistência à transferência de calor. Nessas condições um corpo com formas "fluidodinâmicas" opondo menor resistência ao escoamento do gás irá promover maior troca de calor, enquanto, por exemplo, um paralelepípedo cuja maior dimensão se coloca paralela à direção do escoamento irá desenvolver uma camada limite mais espessa (talvez com descolamento) e, conseqüentemente, menor troca de calor. Quanto mais "fluidodinâmica" for a forma geométrica do corpo, maior será a porcentagem de sua superfície "exposta" ao escoamento (ou "roçamento") principal do gás e, inversamente, quanto menos fluidodinâmica a forma do corpo, menor a porcentagem de sua superfície "exposta" a esse escoamento. Por "superfície exposta" entende-se a porção da superfície onde o escoamento do gás ocorre determinando uma camada limite.

Por analogia com a transferência de calor, nestas condições, podemos dizer que deve existir um efeito da forma também para a transferência de massa; assim, por exemplo, em função da forma pode-se dizer que uma esfera expõe cerca da metade de sua superfície ao escoamento, um cubo imerso na mesma corrente de gás pode

variar a exposição superficial entre $1/2$ a $1/6$ de sua superfície total, e um paralelepípedo pode expor entre $1/2$ a menos de $1/6$ de sua superfície ao escoamento, conforme sua posição em relação à direção do escoamento.

Para o caso de corpos colocados dentro de um leito fluidizado, segundo Heerden, Nobel e van Krevelen (1953), a presença dos inertes recirculando e atingindo a superfície do corpo impede a formação de uma camada limite (devido ao escoamento do gás), fazendo com que desta maneira o efeito da forma geométrica na determinação de uma camada limite não exista.

Para as condições desenvolvidas neste trabalho, as amostras de combustível foram colocadas no leito fluidizado, livres para recirculação dentro do leito, ou presa através de um termopar flexível, que permite que a amostra oscile dentro do leito.

Em termos de porcentagem da área geométrica exposta ao efeito de roçamento do gás dentro de um leito fluidizado, a observação visual das amostras, bem como o registro fotográfico utilizado para os testes da distribuição de massa de combustível dentro do leito, permitem afirmar que os corpos recirculando dentro de um leito fluidizado expõe cerca de 50% de sua superfície externa ao escoamento. Pode-se supor, portanto, que não ocorre efeito da forma sobre a transferência de massa em um leito fluidizado borbulhante.

4.5- Propriedades Físicas dos Combustíveis e sua Influência sobre a Combustão em Leito Fluidizado.

Os testes da taxa específica de queima mostraram que o C.V. Casca, que é poroso e friável, mostrou-se, como esperado, altamente reativo: os carvões vegetais de babaçu e eucalipto, no entanto, revelaram-se surpreendentemente mais reativos que o carvão vegetal de sabugo, que é visualmente mais poroso.

Analisando-se a Tabela 4.1, e tendo em vista os resultados experimentais de reatividade crescente na ordem Grafite, C.V. Sabugo, C.V. Eucalipto, C.V. Babaçu e C.V. Casca, verifica-se que a porosidade medida pelo método do picnômetro apenas diferencia entre a grafite e os carvões vegetais, mas não apresenta uma relação direta com a escala de valores experimentais da taxa de queima.

As medidas da área específica (área superficial interna) pelo método BET, sugerem a forte influência de uma estrutura de microporos sobre a reatividade dos carvões, como sugerido por Turkdogan, Olsson e Vinters (1970), não explicando, no entanto, porque o carvão vegetal de eucalipto ($7,7 \text{ m}^2/\text{g}$) mostra menor reatividade do que os carvões de babaçu ($2,0 \text{ m}^2/\text{g}$) e de casca ($4,4 \text{ m}^2/\text{g}$).

Por outro lado, os trabalhos publicados por Turkdogan e Vinters (1969, 1972) revelam o efeito catalítico sobre a reação de queima de algumas substâncias minerais contidas nas cinzas.

Comparando os dados sobre o conteúdo de cinzas da Tabela 4.1, com a escala de valores para a taxa de queima dos combustíveis testados, observa-se que o teor de cinzas tem um efeito catalítico em todos os combustíveis testados à exceção dos carvões vegetais de eucalipto (0,5% de cinzas) e de sabugo (3,3% de cinzas). Este último, com maior teor de cinzas do que o carvão vege-

tal de eucalipto, apresenta, no entanto, menor taxa de queima.

Se se definir um novo parâmetro comparativo como sendo o produto da área específica pelo conteúdo de cinzas do combustível, verifica-se que ele, conforme está mostrado na Tabela 4.5, apresenta uma escala de valores coerentes com a escala de valores da taxa específica de queima dos combustíveis testados.

Tabela 4.5: Taxa de queima em Função da Área Específica e do Teor de Cinzas do Combustível.

Combustível	A_e (m^2/g)	Cinzas(%)	$(A_e \times \text{Cinzas})$	M ($890^\circ C$) ($\times 10^{-6}$ g/cm 2 .s)
Grafite	1,2	0,2	0,24	5,85
C.V.Sabugo	1,0	3,3	3,3	10,5
C.V.Eucalipto	7,7	0,5	3,85	----
C.V.Babaçu	2,0	6,2	12,4	17,0
C.V.Casca	4,4	17,8	78,3	23,75

4.6- Conclusões

- A taxa de queima de combustível em um leito fluidizado borbulhante a $750^\circ C$ varia proporcionalmente à porosidade das amostras e inversamente ao seu tamanho. A macroporosidade dos sabugos, ao contrário do esperado, não resultou em taxas de queima maiores do que as do carvão vegetal de eucalipto, apresentando valores de mesma ordem de grandeza, embora inferiores. Esse fato é indicativo de que a influência da porosidade sobre a taxa de queima é controlada pelos poros de menor tamanho: meso e microporos, determinantes da área específica.

O tempo para a combustão completa de amostras de combustível de mesma massa varia inversamente com a porosidade do combustível.

- A porosidade medida pelo método do picnômetro permite apenas avaliar diferenças nas taxas de queima (ou reatividade) entre carvões vegetais e grafite, mas não se revelou um bom parâmetro para avaliar diferenças de reatividade entre os carvões vegetais.

- A taxa específica de queima, é crescente na seguinte ordem: Grafite, C.V.Sabugo, C.V.Babaçu e C.V.Casca.

- Os resultados obtidos permitem identificar a área específica medida pelo método de B.E.T., como um parâmetro importante na determinação da reatividade do combustível.

- As cinzas contidas nos carvões vegetais possuem efeito catalítico sobre a reação de combustão em leito fluidizado.

- A velocidade do gás de fluidização dentro do intervalo de 1 a 3 m/s, apresenta uma influência pequena nos valores da taxa de queima.

- A granulometria do material inerte do leito, dentro do intervalo de 0,25 a 0,54 mm, apresenta pouca influência nos valores da taxa específica de queima.

- A diferença de reatividade entre grafite e os carvões vegetais testados determina temperaturas diferentes para a transição do controle da combustão de cinético para difusional: para os carvões vegetais a transição ocorre próximo de 750°C, enquanto para a grafite a mudança ocorre próximo de 1000°C.

- A influência da concentração de oxigênio nos valores da taxa específica de queima é nítida para valores de temperatura nos quais ocorre o regime de controle difusional. Pode se também concluir para a grafite que a influência da concentração de O_2 diminui com a temperatura, através da observação da convergência das curvas da taxa de queima para valores de temperatura menores

de 800°C, o que é coerente com o controle químico. Para carvões vegetais a temperatura para qual a pressão parcial de O_2 começa a ter menor influência sobre as taxas de queima deve estar por volta de 550°C.

Capítulo 5 : Estudo do Efeito de Atrito Sobre a Perda de Massa da Amostra de Combustível na Combustão em Leito Fluidizado Borbulhante.

O objetivo da realização desse estudo foi a verificação da ocorrência ou não da sinergia, sugerida por Salatino e Massimila (1985), entre a perda de massa da amostra de combustível por efeito de atrito com o particulado do leito e a perda de massa devido à reação de queima.

Para tanto comparou-se os valores das perdas de massa por atrito estando o leito à temperatura ambiente com os valores da diferença entre as taxas específicas de queima obtidas com e sem a presença do leito fluidizado.

5.1- Dispositivo Experimental e Operação.

5.1.1- Medida da Perda de Massa das Amostras de Combustível Provocada Pelo Atrito com o Leito Frio.

Os testes para medida da perda de massa das amostras de combustível por atrito com o leito frio foram realizadas com o mini-leito descrito na Figura 4.1, fluidizado com ar à temperatura ambiente.

Utilizou-se alumina com $d_p = 0,32$ mm como material do leito. Foram realizados testes com velocidade superficial do ar de valores 1,0 e 3 m/s e foram usadas amostras de Grafite, C.V.Babaçu, C.V.Eucalipto, C.V.Casca e C.V.Sabugo.

As amostras foram colocadas dentro do leito por um período de 20 minutos, para cada valor da velocidade de fluidização. Os testes para cada tipo de combustível foram feitos em triplicata.

A massa das amostras antes e depois do teste do efeito do atrito foi medida em base seca. A perda de massa das amostras foi calculada da mesma maneira que no cálculo da taxa específica de queima M , e expressa em $(g/cm^2.s)$.

5.1.2- Medida da Taxa Específica de Queima em Leito Fluidizado e em uma Corrente de Gás Quente.

Os testes foram realizados utilizando o mesmo minileito fluidizado descrito anteriormente no capítulo 4. Para realizar os testes com e sem a presença do leito de inertes os experimentos foram iniciados com o leito vazio e, após os testes sem a existência do leito, o reator era preenchido com alumina com $d_p = 0,32$ mm. A altura estática do leito foi de 10 cm.

Utilizou-se como gás de fluidização a mistura de ar com os produtos da queima de G.L.P., nas concentrações de 5 e 10% de oxigênio.

A temperatura do gás foi variada entre 800 e 900°C, mas mantida constante durante cada teste. Durante os testes com o leito vazio, tomou-se a precaução de providenciar que a temperatura das paredes do leito fosse a mesma da corrente do gás.

A diferença nos coeficientes de transferência de calor nas duas condições de teste, impôs a necessidade do preaquecimento das amostras de combustível até a temperatura do gás, antes do início da combustão. Esse procedimento foi realizado aquecendo-se

a amostra em uma corrente de N_2 .

A diferença nos coeficientes da troca de calor também provoca uma variação distinta da temperatura superficial da amostra de combustível, ao longo do tempo. Em função disso foram realizados testes que determinaram o período de 2 minutos como o tempo de residência adequado das amostras. Dentro desse intervalo de tempo foi possível obter a mesma temperatura da amostra na corrente de gás e dentro do leito.

Os testes de queima foram realizados para velocidades do gás de 0,5, 1,0 e 2,0 m/s.

Para efeito de comparação das taxas de perda de massa das amostras foram mantidos os mesmos valores de temperatura, concentração de O_2 , e velocidade do gás, para cada condição de teste com e sem a presença do leito.

A massa das amostras antes e depois do teste foi medida em base seca. Os valores da taxa específica de queima, M , foram também calculados em $(g/cm^2.s)$.

5.2- Apresentação dos Resultados Experimentais.

5.2.1- Perda de Massa das Amostras de Combustível Devido ao Atrito no Leito Fluidizado a Frio.

Os resultados da perda de massa das amostras devido ao atrito com os inertes do leito estão apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1- Perda de Massa das Amostras Devido ao Atrito com o Leito ($\text{g/cm}^2.\text{s}$).

Combustível	U (m/s)	
	1	3
Grafite	$0,3 \times 10^{-6}$	$0,6 \times 10^{-6}$
C.V.Babaçu	0,4	0,7
C.V.Eucalipto	0,5	0,8
C.V.Casca	3,0	5,0
C.V.Sabugo	2,0	4,0

Os resultados acima mostram que os carvões C.V.Casca e C.V.Sabugo apresentam as maiores perdas de massa por atrito. Esses valores podem ser atribuídos à friabilidade desses combustíveis. Observa-se ainda a esperada dependência da perda de massa por atrito (mecânico cinético) com a velocidade do gás, sendo maior a perda de massa na velocidade maior.

5.2.2- Taxa Específica de Queima no Leito Fluidizado e na Corrente de Gás.

Os valores da taxa específica de queima, M , são valores da perda de massa total, que incluem as perdas devido ao atrito. Os resultados estão apresentados nas Figuras 5.1 a 5.4, em função da área específica, que é um parâmetro característico de cada combustível; adotou-se esse critério de apresentação para melhor visualização dos resultados de cada combustível. Os pontos claros representam as medidas feitas apenas com a corrente de gás quente no leito vazio. Os pontos escuros representam as medidas realizadas com a presença do leito fluidizado.

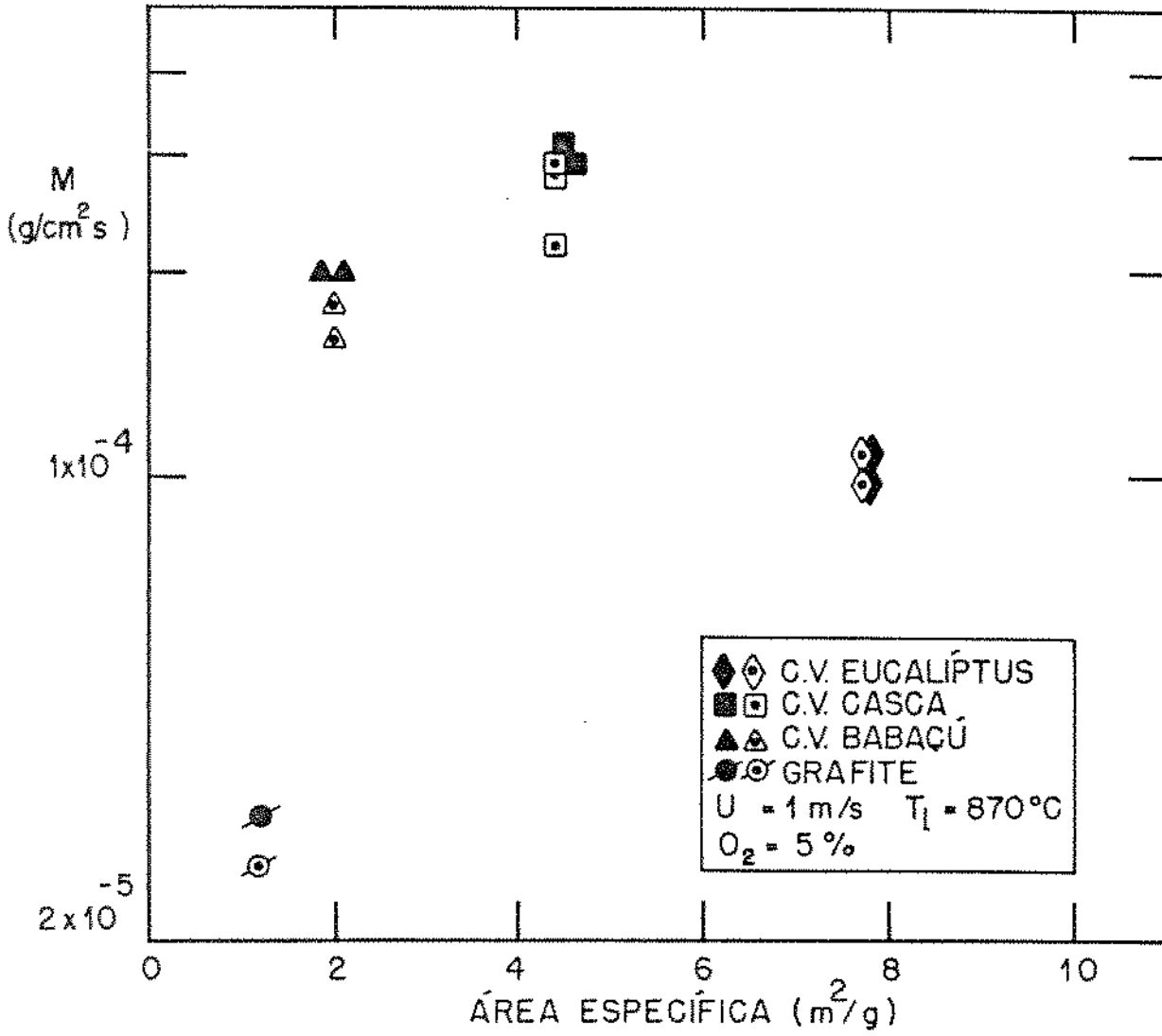


Figura 5.1: Taxa Específica de Queima, M_1 , em função da Área Específica. Comparação entre os Valores Obtidos na Corrente de Gás e no Leito Fluidizado.

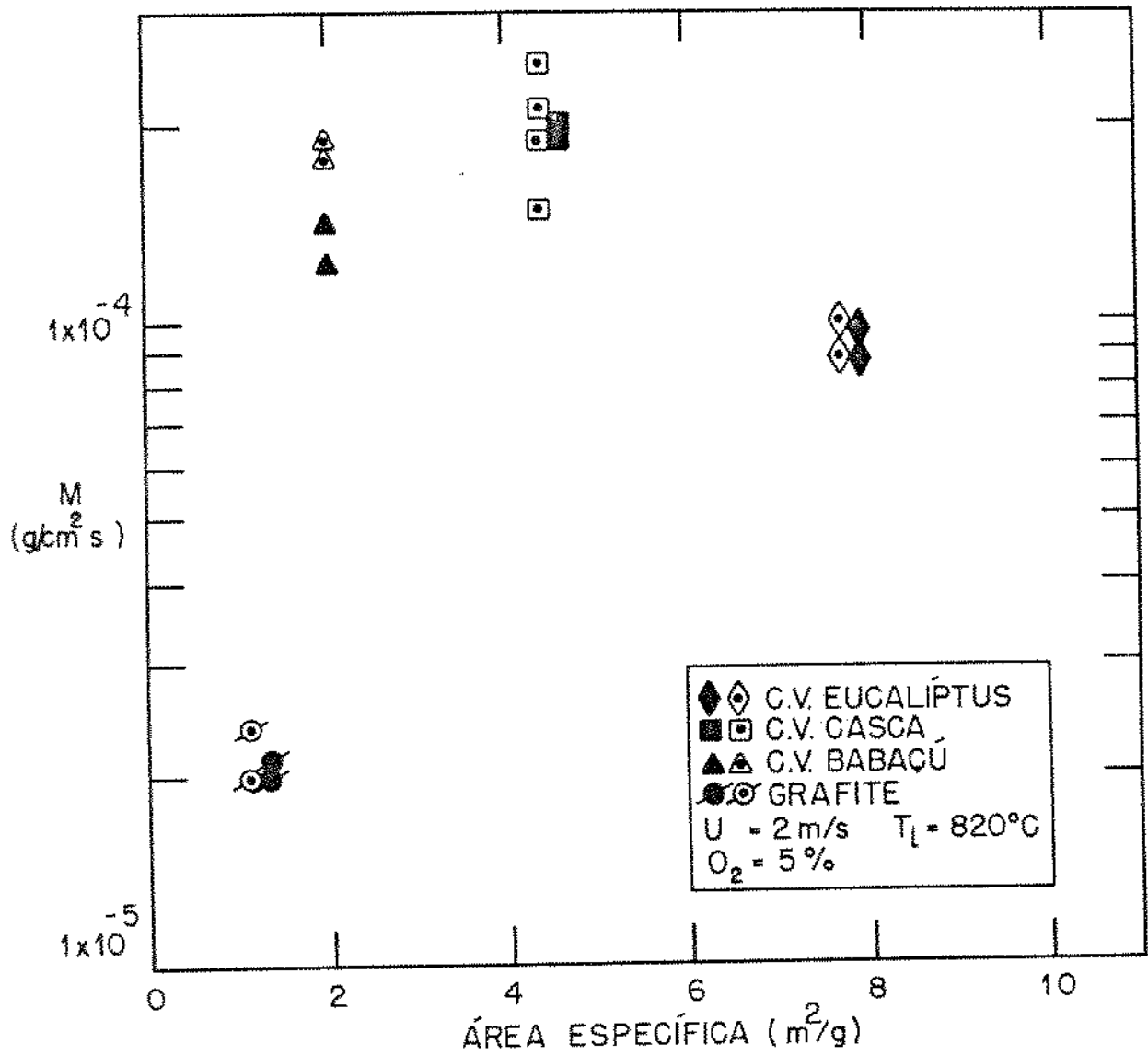


Figura 5.2: Taxa Específica de Queima em Função da Área Específica. Comparação entre os Valores Obtidos na Corrente de Gás e no Leito Fluidizado.

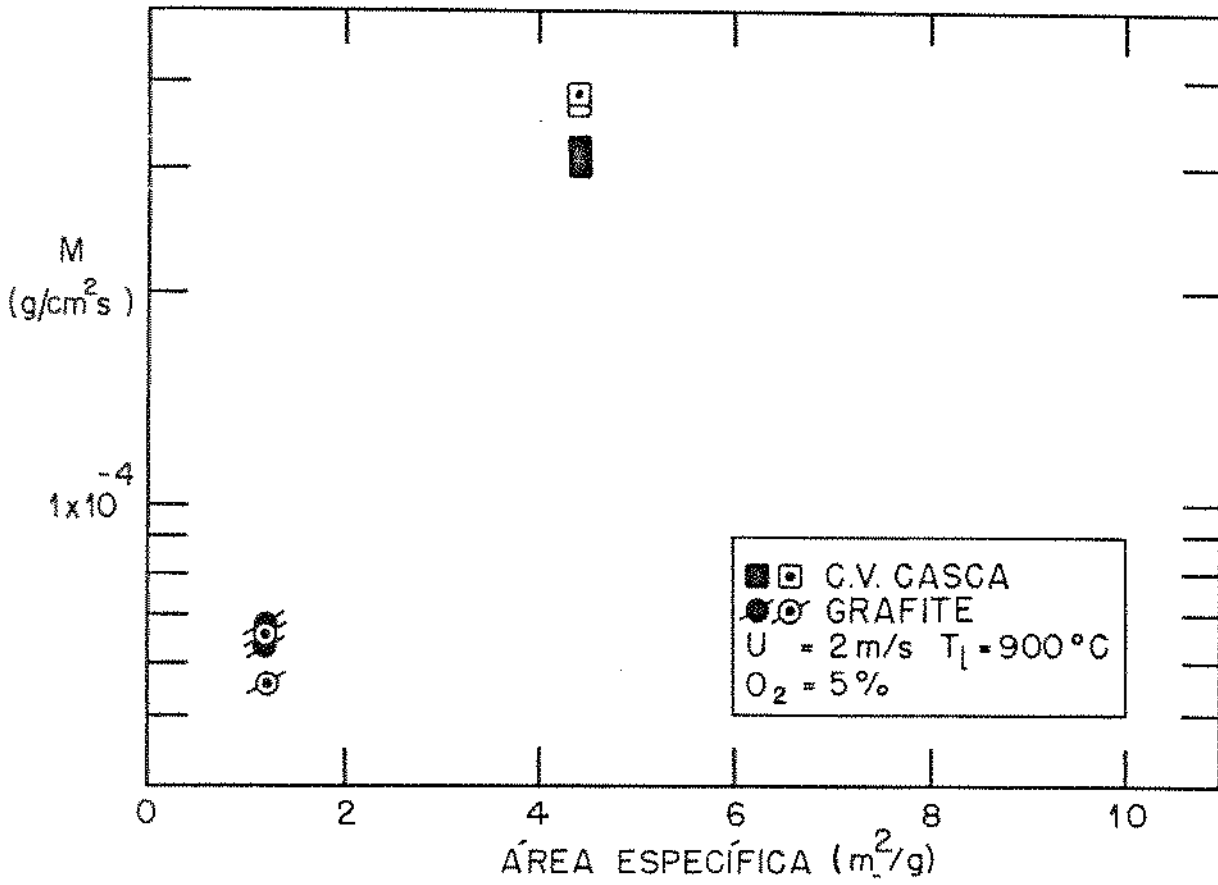


Figura 5.3: Taxa Específica de Queima em função da Área Específica. Comparação entre os Valores obtidos na Corrente de Gás e no Leito Fluidizado.

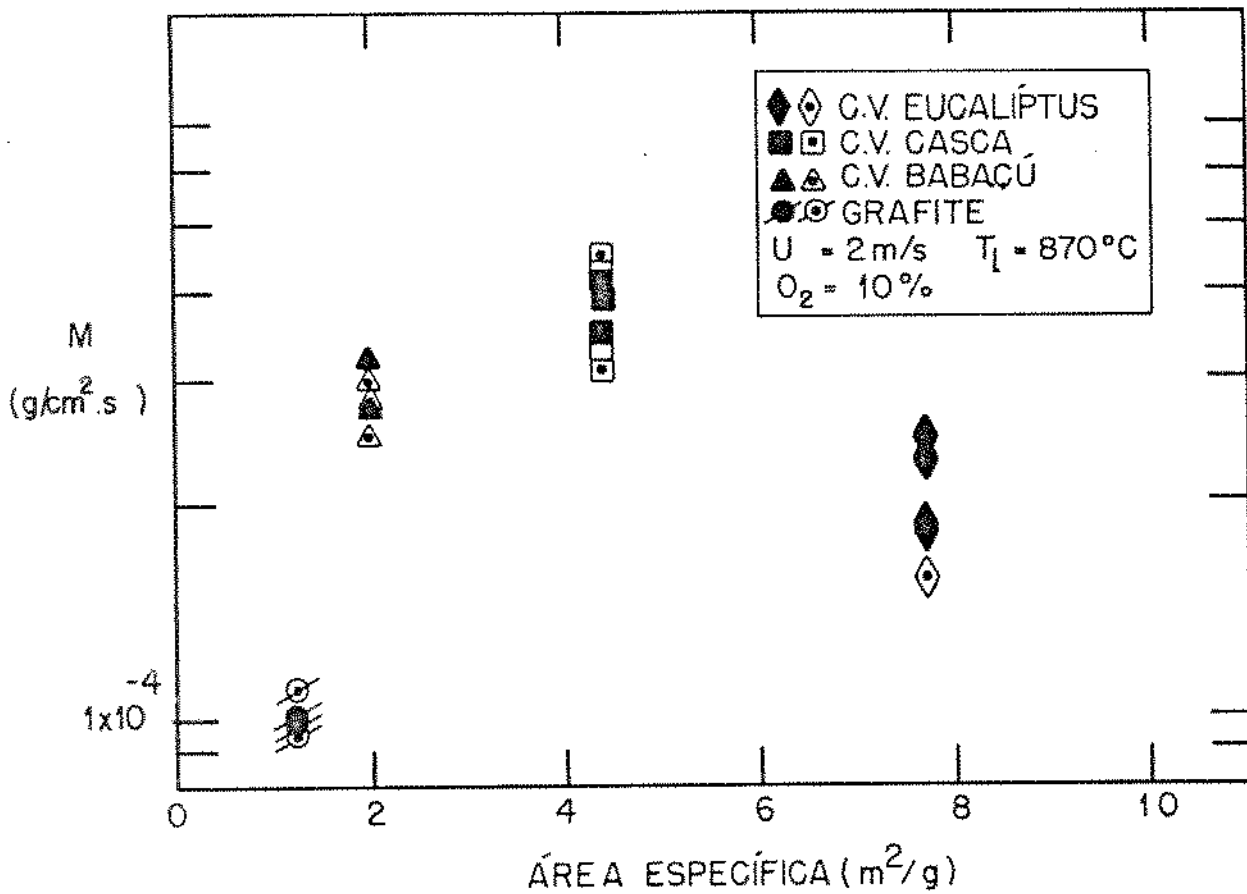


Figura 5.4: Taxa Específica de Queima, M_1 , em Função da Área Específica. Comparação entre os Valores Obtidos na Corrente de Gás e no Leito Fluidizado.

A análise dos gráficos mostra que, contrariamente ao esperado, mesmo no caso de um combustível friável, como o C.V.Casca, a presença física do leito de inertes não altera significativamente os valores de perda de massa total dos combustíveis em relação aos obtidos na corrente de gás quente.

5.3- Discussão dos Resultados

Os resultados expressos na Tabela 5.1, mostram que o efeito do atrito no leito sobre as amostras de combustível existe e é mensurável. Para melhor entendimento dos dados das Figuras 5.1 a 5.4, apresenta-se na Tabela 5.2 a comparação entre a perda de massa total (expressa por M , e que inclui a perda de massa por

atrito) e a perda de massa devido apenas ao atrito.

Os valores de M foram obtidos nos testes discutidos no Capítulo 4, com leito de alumina de $d_p = 0,32$ mm, fluidizado com velocidades de 1 e 3 m/s, $O_2 = 10\%$, nas temperaturas de 750, 850 e 950°C. Os valores de DM são os da perda de massa por atrito, conforme a Tabela 5.1, expressos como porcentagem relativa a M.

Tabela 5.2- Comparação entre a Perda de Massa por Atrito e a Perda de Massa Devido a Queima.

Leito de Alumina : $d_p = 0,32$ mm		$O_2 = 10\%$		
Combustível	M (g/cm ² .s)	DM devido ao atrito (%)	U (m/s)	T _L (°C)
Grafite	7×10^{-6}	4,3	1	750
	45	0,67	1	850
	105	0,28	1	950
	20	3,0	3	750
	65	0,92	3	850
	130	0,46	3	950
C.V.Babaçu	100×10^{-6}	0,40	1	750
	150	0,27	1	850
	180	0,22	1	950
	150	0,47	3	750
	180	0,39	3	850
	210	0,33	3	950
C.V.Sabugo	110×10^{-6}	1,8	1	750
	115	1,7	1	850
	125	1,6	1	950
	120	3,3	3	750
	130	3,1	3	850
	145	2,8	3	950
C.V.Casca	180×10^{-6}	1,7	1	750
	225	1,3	1	850
	270	1,1	1	950
	245	2,0	3	750
	300	1,7	3	850
	350	1,4	3	950

A análise da Tabela 5.2 mostra que a perda de massa por atrito diminui com o aumento da temperatura. Isso se deve ao fato que a perda de massa por atrito é um efeito mecânico cinético

,que se mantém constante para cada velocidade do gás, enquanto a perda de massa pela reação de queima aumenta com a temperatura. Portanto, na combustão fluidizada o efeito do atrito na taxa de queima se torna menos significativo quando se opera o leito a temperaturas mais altas.

Os valores de perda de massa por atrito, para $T > 850^{\circ}\text{C}$, são menores do que 3% da taxa de queima e não justificam uma correção dos valores da M , pois sua influência é significativamente menor do que a dos erros experimentais no cálculo de M , os quais são da ordem de até 15%.

Os resultados para perda de massa por atrito são coerentes com as informações de Chakraborty e Howard (1980 e 1981), que consideram não significativas a perda de massa por atrito para amostras esféricas de eletrodos de carbono.

Analisando ainda os resultados das Figuras 5.1 a 5.4, o fato das taxas de queima serem praticamente iguais, dentro do leito e na corrente de gás, contraria também a idéia de que os inertes do leito agiriam como promotores de turbulência, aumentando o coeficiente de transferência de calor, como descrito por Botterill (1975), e por analogia, aumentando também os coeficientes de transferência de massa, como descrito por La Nauze (1985a).

Em um leito fluidizado a capacidade térmica das partículas sólidas do leito é da ordem de 1000 vezes maior do que a capacidade térmica do gás intersticial, enquanto a velocidade média das partículas é cerca de 10 vezes menor do que a velocidade do gás. Torna-se claro, portanto, que o transporte convectivo de calor pelo movimento das partículas do leito é muito importante quando comparado com outros processos de troca de calor.

Por analogia entre a transferência de calor e a transferência de massa foi proposto por van Heerden, Nobel e Krevelen (1953) que para transferência de massa o equivalente à capacidade térmica das partículas (capacidade de armazenar calor) seria a capacidade de adsorção de massa. Ou seja, a capacidade das partículas inertes do leito adsorverem massa em um ponto do leito e a liberarem em outro ponto do leito.

Foi provado experimentalmente pelos autores que, se as partículas constituintes do leito forem impermeáveis, tal que não ocorra adsorção de massa, os coeficientes de transferência de massa em leito fluidizado serão iguais aos coeficientes da transferência de massa em leito fixo.

Prins, Carteleijn, Draaijer e van Swaaij (1985) confirmam experimentalmente os resultados de van Heerden, Nobel e Krevelen (1953). Embora os resultados de ambos os trabalhos tenham sido obtidos para vaporização de esferas de naftaleno à baixas temperaturas, as correlações empíricas propostas pela pesquisa mais recente foram aplicadas com sucesso para a combustão de coque em leito fluidizado, de La Nauze e Jung (1982b).

Assim sendo, de acordo com o exposto, os resultados das Figuras 5.1 a 5.4 seriam devidos ao uso de inertes não porosos (alumina) como material do leito.

5.4- Conclusões.

- A perda de massa das amostras por efeito do atrito com os inertes do leito é uma função da velocidade do gás e da friabilidade do combustível;

- Não ocorre sinergia mensurável entre a reação de queima em leito fluidizado e a perda de massa das amostras devido ao atrito com o leito;

- Para temperaturas do leito acima de 850°C, a perda de massa por atrito é inferior a 3% da perda de massa pela reação de queima;

- Usando-se o pré-aquecimento das amostras de combustível, verifica-se que a presença física do leito fluidizado não tem influência significativa sobre a taxa de queima dos combustíveis testados em relação aos valores obtidos na corrente de gás, o que teria ocorrido pelo uso de inertes não porosos para material do leito.

Capítulo 6- Estudo da Devolatilização de Biomassa e das Condições que Favorecem a Queima dos Voláteis Dentro de um Leito Fluidizado Borbulhante.

Como foi visto anteriormente na capítulo 2, uma característica marcante da biomassa é seu alto conteúdo de matéria volátil, que chega a 85% em base seca, e cuja queima libera cerca de 60% da sua energia.

A tecnologia da combustão em leito fluidizado apresenta como características importantes a alta taxa de transferência de calor entre o leito e uma superfície imersa, e uma alta eficiência de combustão, mesmo para combustíveis de baixo poder calorífico. O potencial de utilização dessas duas características do leito fluidizado, implica necessariamente que a energia da queima do combustível utilizado seja liberada dentro do leito pois, em caso contrário, a extração direta de calor do leito será diminuída.

Levando ainda em conta que a queima de voláteis de um combustível vegetal ocorre de maneira muito rápida, é necessário conhecer as condições de operação do leito, bem como as características da biomassa utilizada, que favorecem a sua liberação e queima dentro do leito.

6.1- Dispositivo Experimental e Operação.

6.1.1- Estudo do Tempo de Devolatilização de Biomassa.

O estudo do tempo de devolatilização de biomassa em leito fluidizado foi realizado com o mini-leito descrito no capítulo 4.

O ar para fluidização foi aquecido eletricamente. Utilizou-se alumina de $d_p = 0,32$ mm como material do leito. Manteve-se a velocidade de fluidização sempre próxima de $1,0$ m/s. As temperaturas de teste foram 400 , 600 , 800 e 1000°C , medidos com termopar tipo k, mergulhado no leito.

Os ensaios foram realizados com volumes de 2 a 6 cm^3 de amostras de combustível, após a estabilização da temperatura desejada. O tempo de devolatilização, para efeito deste estudo, foi definido como o intervalo de tempo medido (através de observação visual) do instante de alimentação da amostra de combustível no leito até o término da evolução dos fumos, ou até a extinção das chamas (no caso de temperaturas mais elevadas, quando ocorre a queima dos voláteis). Esta definição corresponde ao procedimento usado por Pillai (1981,1985) e Wildegger-Gaissmaier e Agarwal (1990) entre outros.

Com a finalidade de analisar a influência do leito fluidizado no tempo de devolatilização, optou-se por realizar testes paralelos sem a presença física do leito. Esses testes foram realizados em um forno de tubo cilíndrico horizontal com 45 mm de diâmetro interno, aquecido eletricamente, na presença de um escoamento de ar.

Os testes foram feitos para as temperaturas de 400 , 600 , 800 , e 1000°C . A vazão de ar utilizada durante as medições proporcionava uma velocidade de gás da ordem de $1,0$ m/s.

Mantive-se o procedimento para medida do tempo e devolatilização.

Foram utilizadas amostras de peroba rosa, eucaliptus alba e bagaço de cana. As amostras de peroba e de eucalipto, foram pre-

paradas na forma de serragem, de cubos de 5 e 10 mm de aresta e cilindros de 20 mm de diâmetro e 20 mm de altura, para observação da influência do tamanho e da massa da amostra sobre o tempo de evolução dos voláteis. O bagaço foi testado na sua condição natural e também em "pellets" cilíndricos com 10 mm de diâmetro e 10 mm de altura.

6.1.2- Estudo das Condições que Favorecem a Queima de Voláteis da Biomassa dentro de um Leito Fluidizado Borbulhante.

Esse estudo baseia-se no trabalho de Santos (1981), utilizando-se um queimador de leito fluidizado construído em tubo de aço de 10", com 200 cm de altura e diâmetro interno de 20 cm na região do leito. O reator está mostrado na Figura 6.1.

Utilizou-se areia de $0,25 < d_p < 0,80\text{mm}$ como material do leito. A admissão e distribuição de ar no leito foi feita através de uma placa de aço, com 5mm de espessura e furos de 1mm.

A alimentação de combustível no leito podia ser realizada pneumáticamente dentro do leito e também por gravidade, através da abertura no topo do reator.

Utilizou-se termopares tipo k para as medidas da temperatura no reator, e um aparelho de Orsat para a determinação do teor de CO , CO_2 , e O_2 nos gases de saída, permitindo a verificação do desempenho do reator para a queima.

Os testes tinham início com a ignição de um leito de carvão granulado (2-4mm), após o que aumentava-se a vazão de ar, promovendo a fluidização do leito de combustível. A formação do leito

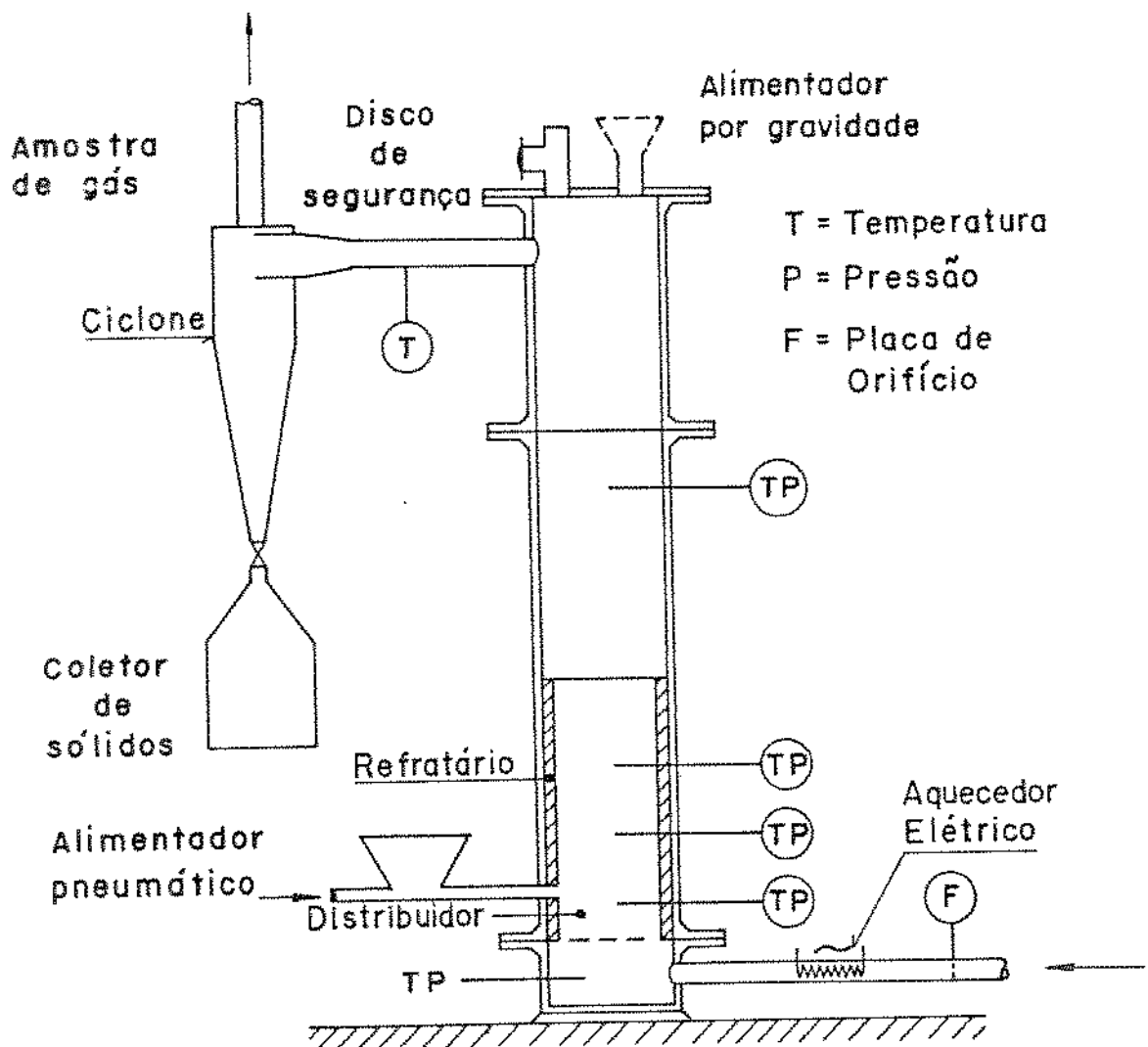


Figura 5.1: Reator de Combustão em Leito Fluidizado.

quente de inertes foi obtida através de adição alternada de areia e de carvão, até que o leito atingisse a altura desejada.

Somente após a formação do leito e a obtenção de uma temperatura de 800 a 850 °C é que se procedia à mudança do combustível, de carvão vegetal para a biomassa de teste.

A avaliação do desempenho de queima dos voláteis se deu através da observação visual da presença de chama acima do leito e da recirculação do combustível, bem como da facilidade de manutenção da temperatura do leito. A observação da estabilidade da temperatura do leito é tanto mais importante quanto maior o teor de umidade da biomassa alimentada, que requer parte da energia dos voláteis para sua vaporização.

Foram realizados testes de queima com cavaco de madeira, sargento de milho, casca de arroz, serragem e bagaço de cana. Os testes foram realizados para diferentes velocidades de fluidização e para várias alturas de leito, entre 10 e 30 cm (medida estática).

6.2- Apresentação dos Resultados Experimentais.

6.2.1- Medida do Tempo de Devolatilização.

Verificou-se que para uma mesma densidade e tamanho de amostra, a variação da massa alimentada ao leito não altera o tempo de devolatilização. Atribui-se esse fato à pequena carga térmica representada pela massa das amostras em relação à capacidade térmica do forno e do leito utilizado.

Os resultados obtidos para os tempos de devolatilização com a presença do leito fluidizado (t_{f1}) e sem a sua presença (t_f)

são apresentados nas Tabelas 6.1 a 6.6, em função da temperatura e do tamanho da amostra, para peroba rosa, eucaliptus alba e bagaço de cana.

Tabela 6.1- Tempo de Devolatilização da Peroba Rosa em Leito Fluidizado - (em segundos).

Dimensão das Amostras	Temperatura °C			
	400	600	800	1000
Serragem	9	4	2	2
Cubo : 5 mm	73	41	30	22
Cubo : 10 mm	182	84	57	57
Cilindro : 20 mm	-	214	175	109

Tabela 6.2- Tempo de Devolatilização da Peroba Rosa Sem Leito - (em segundos).

Dimensão das Amostras	Temperatura °C			
	400	600	800	1000
Serragem	86	33	31	43
Cubo : 5 mm	195	75	65	52
Cubo : 10 mm	193	105	86	78
Cilindro : 20 mm	572	241	191	154

Tabela 6.3- Tempo de Devolatilização do Eucaliptus Alba em Leito Fluidizado - (em segundos).

Dimensão das Amostras	Temperatura °C			
	400	600	800	1000
Serragem	18	4	2	2
Cubo : 5 mm	66	26	20	15
Cubo : 10 mm	129	86	64	46

Tabela 6.4- Tempo de Devolatilização do Eucaliptus Alba
Sem Leito - (em segundos).

Dimensão das Amostras	Temperatura °C			
	400	600	800	1000
Serragem	136	48	41	34
Cubo : 5 mm	156	71	48	41
Cubo : 10 mm	258	70	66	66

Tabela 6.5- Tempo de Devolatilização do Bagaço de Cana em
Leito Fluidizado - (em segundos).

Dimensão das Amostras	Temperatura °C			
	400	600	800	1000
Bagaço	5	9	3	2
Bagaço Peletizado	99	61	51	38

Tabela 6.6- Tempo de Devolatilização do Bagaço de Cana
Sem Leito - (em segundos).

Dimensão das Amostras	Temperatura °C			
	400	600	800	1000
Bagaço	72	27	19	20
Bagaço Peletizado	126	88	45	55

A análise destes resultados mostra que:

- Para uma mesma temperatura o tempo de evolução dos voláteis aumenta com o tamanho das amostras;
- Para o mesmo tamanho de amostra, o tempo de devolatilização diminui com o aumento da temperatura;
- De maneira geral, para os diferentes tipos e tamanhos de amostras, o tempo de devolatilização completa é maior sem a presença do leito fluidizado.

A Tabela 6.7, traz o tempo de devolatilização em função da densidade do combustível para amostras cúbicas de 10 mm de aresta.

Tabela 6.7- Tempo de Devolatilização em Função da Densidade para a Dimensão de 10 mm - (em segundos).

Combustível	Densidade (g/cm ³)	Leito	Temperatura °C			
			400	600	800	1000
Peroba	1,1	Fluidizado	132	94	57	57
Rosa		Sem leito	193	105	86	78
Eucaliptus	1,0	Fluidizado	129	86	64	46
Alba		Sem leito	258	70	66	66
Bagaco de Cana	0,9	Fluidizado	99	61	51	38
Peletizado		Sem leito	126	88	45	55

Pode-se observar que o tempo de devolatilização diminui com a densidade em todas as temperaturas testadas.

A dependência do tempo de devolatilização em relação ao tamanho das amostras pode ser melhor analisada na Tabela 6.8.

Tabela 6.8- Razão entre o Tempo de Devolatilização Sem e Com a Presença do Leito Fluidizado (t_f/t_{fj}).

Combustível : Peroba Rosa

Dimensão da Amostra	Temperatura [°C]			
	400	600	800	1000
Serragem	9,6	9	15,5	21,5
Cubo : 5 mm	2,7	1,8	2,2	2,4
Cubo : 10 mm	1,1	1,3	1,5	1,4
Cilindro : 20 mm	-	1,1	1,1	1,4

Combustível : Eucaliptus Alba

Dimensão das Amostras	Temperatura [°C]			
	400	600	800	1000
Serragem	7,6	12	20,5	17
Cubo : 5 mm	2,4	2,7	2,4	2,7
Cubo : 10 mm	2,0	0,6	1,0	1,4

Combustível : Bagaço de Cana

Dimensão das Amostras	Temperatura [°C]			
	400	600	800	1000
Bagaço	14,4	3	6,3	10
Bagaço Peletizado	1,3	1,4	0,9	1,4

Analisando a Tabela 6.8, confirma-se que as taxas de devolatilização em leito fluidizado são maiores do que sem leito; a razão entre t_f e t_{fj} , no entanto, mostra que a diferença entre ambos diminui com o aumento do tamanho da amostra de combustível, indicando que as amostras pequenas são mais sensíveis a presença do leito.

A relação entre os tempos de devolatilização com e sem a presença do leito fluidizado, sugere que a devolatilização é controlada pela transferência de calor para a superfície da amostra no caso do combustível finamente dividido e que o controle é difusional através da massa da amostra para pedaços grandes de com-

bustível.

Esse resultado fica mais fácil de perceber, lembrando que os mecanismos que controlam a taxa de devolatilização são:

- i- A transferência de calor para a superfície do combustível, que é função da sua granulometria;
- ii- A transferência de calor através do corpo do combustível, que é função da sua condutividade térmica;
- iii- A transferência de massa dos voláteis do interior do combustível até a sua superfície externa, função da porosidade da biomassa.

Observar que o efeito da temperatura sobre as reações químicas envolvidas na devolatilização não é considerado como um mecanismo de controle da taxa, porque a biomassa à temperatura de 300-400°C já liberou mais de 90% de seu conteúdo de voláteis e o interesse das presentes medidas está em temperaturas acima desse intervalo, onde esse mecanismo não é mais controlador.

Verifica-se que os mecanismos de controle da taxa de devolatilização de biomassa dividem-se em um efeito externo à amostra (etapa i) e dois efeitos internos (etapas ii e iii).

Em função disto, podemos estudar o efeito do tamanho da amostra na taxa de devolatilização, através da análise da relação área/massa, onde a área externa se relaciona com o primeiro mecanismo, e a massa se relaciona com o segundo e terceiro mecanismos.

Numa amostra de dimensão característica L , a área externa é função de L^2 , enquanto a massa é função de L^3 , então:

- Quando se diminui o tamanho da amostra, aumenta-se a razão área/massa e, conseqüentemente, a influência dos fatores externos, como a transferência de calor para sua superfície;

- Quando se aumenta o tamanho da amostra, aumenta-se proporcionalmente a influência dos fatores internos à amostra, através das etapas (ii) e (iii).

Num combustível finamente dividido as etapas (ii) e (iii) são muito rápidas, porque é menor o trajeto através do qual o calor tem de ser transmitido e os voláteis de se difundirem.

Considerando ainda as condições do teste dentro do forno tubular, no qual as amostras ficam agrupadas num pequeno "monte", em condições semelhantes às de um leito fixo, e considerando que dentro do leito fluidizado as amostras se dispersam por efeito de recirculação dos inertes, pode-se admitir que os valores mais altos da razão t_f/t_{f1} na Tabela 6.8 (principalmente para bagaço e serragem) são devidos à diferença na transferência de calor nas duas condições:

- 300 W/m²°C (Botterlell, 1975) no leito fluidizado, e
- 40 W/m²°C (Kreith, 1977) no forno tubular, onde o coeficiente de troca de calor é semelhante ao de um leito fixo.

Para pedaços grandes de biomassa combustível, com valores semelhantes de condutividade térmica, a taxa de devolatilização deve ser controlada pela etapa (iii), sendo a difusão dos voláteis através das estruturas de poros o passo mais lento do processo. Esse raciocínio é coerente com os dados da Tabela 6.8, onde em função do aumento do tamanho da amostra, a razão t_f/t_{f1} se aproxima da unidade diminuindo, portanto, a diferença entre os tempos de devolatilização obtidos com e sem a presença do leito.

6.2.2- Fatores que Favorecem a Queima dos Voláteis de Biomassa dentro do Leito Fluidizado.

Observou-se que a queima de sabugos de milho e de cavacos de madeira em leito raso (cerca de 10 cm) e $U=1,0$ m/s, ocorreu com a presença de muita chama acima do leito, logo após a alimentação do combustível.

A presença de chama indica a queima dos voláteis fora do leito, favorecida pela pequena profundidade do leito, forçando os pedaços grandes de combustível - cavacos com até 5 cm e sabugo com até 10 cm - a estarem sempre próximos a superfície do leito.

O aumento da altura do leito promoveu uma boa distribuição de massa para os cavacos de madeira, percebida através da ausência de chama ou fumaça, acima do leito, indicando que a queima dos voláteis ocorria internamente ao leito.

Para sabugos, com maior tamanho e menor densidade em relação aos cavacos de madeira, a elevação da altura do leito promoveu uma diminuição significativa da quantidade de chama acima do leito, indicando uma melhora na queima dos voláteis dentro do leito e também que para $U=1,0$ m/s a distribuição de massa de sabugos no leito ainda apresenta uma tendência de segregação no topo do leito.

No caso da queima de cavacos de madeira com leito raso, observou-se que o aumento da velocidade do gás de 1,0 para 1,3 m/s promoveu a diminuição da chama acima do leito e melhorou a estabilidade de sua temperatura. Atribui-se essa melhora à melhor distribuição de cavaco no leito.

Com um leito de 30 cm de altura e velocidade do gás de $U=1,3$ m/s, verificou-se que o desempenho dos dois combustíveis foi bom, queimando sem a presença de chama ou fumaça acima do leito. Em especial para os sabugos, o aumento da velocidade promoveu uma melhor mistura com o leito, concordando com as observações realizadas no Capítulo 3 desta tese.

Bagaço, serragem e casca de arroz apresentaram problemas para a obtenção de boas condições de queima. O primeiro problema ocorreu na alimentação desses combustíveis. Bagaço, com grande quantidade de fibras longas, apresenta problemas para a alimentação através de um sistema de rosca ou pneumático. A utilização de alimentação por gravidade no topo do leito provocou a sua ignição antes de chegar ao leito e grande parte da combustão foi completada na região acima do leito, provocando seu resfriamento.

A serragem pode ser alimentada pneumaticamente, com alguns problemas devido principalmente à escala. No entanto, mesmo para alimentação dentro do leito, uma quantidade considerável da serragem apresentou elutriação e queima acima do leito. Para serragem, a queima em leito fluidizado necessitaria que o combustível fosse "peletizado" ou que a sua queima se realizasse em leito rápido.

A casca de arroz pode ser alimentada por gravidade e, embora sofrendo ignição acima e próxima a superfície do leito, a temperatura dentro do leito se manteve estável, indicando que parte do combustível queima dentro do leito.

6.6- Conclusões.

- O aumento do tempo de evolução dos voláteis é favorecido pelo aumento do tamanho e da densidade do combustível, e por menores temperaturas do leito.

- O aumento do tempo de evolução dos voláteis, pela diminuição da temperatura de operação do leito não parece ser uma boa alternativa para melhorar a queima, pois a ignição dos voláteis requer temperaturas acima de 750°C .

- De maneira geral o tempo de devolatilização completa da biomassa é menor com o leito fluidizado do que no forno tubular.

- A razão entre o tempo de devolatilização, com e sem a presença do leito fluidizado, sugere que a devolatilização é controlada pela transferência de calor para a superfície da amostra, para combustível finamente dividido, e que o controle é difusional através da massa da amostra, para pedaços grandes de combustível.

- A queima dos voláteis dentro do leito é favorecida por aumento na altura do leito, e pela maior velocidade de fluidização, que promove melhor mistura e recirculação do combustível no leito.

- Para combustíveis com pequeno tamanho e baixa densidade, além dos problemas de se determinar as condições de operação do leito, nas quais pode ocorrer boa mistura, o problema da sua alimentação requer pesquisa adicional.

Capítulo 7- Conclusões e Sugestões.

Como ocorre em muitos processos industriais, a combustão fluidizada é um exemplo no qual a aplicação se deu antes do entendimento perfeito dos mecanismos das reações envolvidas. Por isso, embora o processo de queima em leito fluidizado já esteja sendo implantado em vários países, incluindo o Brasil, se faz necessário pesquisar os mecanismos da reação de combustão, em especial para o caso de pedaços grandes de combustíveis vegetais visando uma queima limpa e de alta eficiência. Nesta tese, trabalhou-se com o objetivo de conseguir melhorar o conhecimento do processo de queima e de obter parâmetros para o projeto de queimadores de leito fluidizado borbulhante.

a. Fluidodinâmica.

Considerou-se para o estudo da distribuição de massa de combustível no leito, a distinção de três regiões (ou fases): região de emulsão ou fase densa, região de bolhas e região de "splash" acima do leito.

As amostras de combustível foram simuladas por blocos cilíndricos de madeira em diferentes valores de diâmetro, comprimento e densidade.

Utilizou-se areia ou alumina como material do leito, com granulometria entre $d_p = 0,25\text{mm}$ (areia e alumina) e $d_p = 0,85\text{mm}$ (areia), caracterizando as partículas do leito como dos tipos K e U segundo a classificação de Geldart.

O escoamento de gás nas fases de emulsão e de bolhas caracteriza-se pela presença de "bolhas lentas", isto é, $(U_b \cdot E_{mf} / U_{mf})$ menor que 1, e pela igualdade da concentração de oxigênio nas duas fases.

O uso de velocidade U de 1,0, 2,0 e 3,0 m/s caracterizou o regime fluidizado borbulhante, sendo que para $U = 3,0$ m/s com alumina de $d_p = 0,25$ mm o regime de fluidização apresentou maior turbulência dentro do leito.

Os resultados dos testes a frio sobre a distribuição das amostras de combustível dentro do leito fluidizado, mostraram que:

- A distribuição das amostras de combustível fora da emulsão é fortemente influenciada pelo regime de fluidização, expresso em função da razão U/U_{mf} ;

- Para cada valor de densidade das amostras de madeira, o aumento de seu tamanho provoca um aumento no número de ocorrências de amostra fora da emulsão. O efeito do tamanho das amostras no leito é favorecido e melhor notado para baixos valores da razão U/U_{mf} .

- A principal região de ocorrência de amostras fora da emulsão é a região de "splash", para todos os valores de densidade e de tamanho das amostras testadas.

- Não se verificou um efeito significativo da população na ocorrência de amostras fora da emulsão.

- O aumento da velocidade do ar produz um aumento no tempo de contato entre a amostra de combustível e a região de bolhas. O aumento da velocidade de fluidização promove uma diminuição da densidade do leito, aumentando a densidade relativa das amostras

de combustível, o que favorece a melhor mistura entre as amostras e os inertes do leito e diminui a ocorrência de amostras na região de "splash".

- A diminuição da densidade das amostras favorece ao aumento de sua ocorrência fora da emulsão.

É necessário conhecer a distribuição de massa de combustível dentro do leito, para assegurar que não ocorra segregação e queima localizada alterando a homogeneidade de temperatura característica de um leito fluidizado.

b. Queima de Carbono Sólido em Leito Fluidizado.

Tradicionalmente os estudos da queima em leito fluidizado se referem ao estudo da oxidação do carbono fixo do combustível. Isso ocorre devido a rapidez na devolatilização e queima dos voláteis em relação aos tempos de queima do carbono sólido dentro do leito.

Também para biomassa o tempo de queima completa do carbono fixo é muito maior do que o tempo de queima dos voláteis, de maneira que a maior parte da biomassa combustível dentro do leito é efetivamente carvão vegetal ou o carbono fixo resultante da devolatilização da biomassa.

Apresentam-se aqui os resultados da queima dos carvões vegetais de sabugo de milho, de casca de Eucaliptus Alba, de Eucaliptus Saligna, e de endocarpo de babacu. São apresentados também os resultados da queima da grafite a qual foi utilizada como padrão comparativo.

O tamanho das amostras de carvão vegetal e de grafite usadas nos testes de queima, foi da mesma ordem do das menores amostras utilizadas nos testes a frio de distribuição de massa. Coerente com a boa distribuição de massa dentro do leito, observada para amostras pequenas no leito bidimensional, verificou-se que nos testes de queima com a utilização de cestos de tela metálica, conforme a figura 4.1, todos os combustíveis apresentaram boa recirculação dentro do leito.

A análise dos testes realizados, permitiu verificar que:

- A taxa de queima do combustível em um leito fluidizado borbulhante a 750°C varia proporcionalmente à porosidade das amostras e inversamente ao seu tamanho. A macroporosidade dos sa-bugos, ao contrário do esperado não resultou em taxas de queima maiores do que as do carvão vegetal de eucalipto, apresentando valores de mesma ordem de grandeza, mas inferiores. Esse fato é indicativo de que a influência da porosidade sobre a taxa de queima é controlada pelos poros de menor tamanho : meso e microporos, determinantes da área específica.

O tempo para a combustão completa de amostras de combustível de mesma massa varia inversamente com a porosidade do combustível.

- A porosidade medida pelo método do picnômetro permite apenas avaliar diferenças nas taxas de queima (ou reatividade) entre carvões vegetais e grafite, mas não se revelou um bom parâmetro para avaliar diferenças de reatividade entre os carvões vegetais.

- A taxa específica de queima, é crescente na seguinte ordem: grafite, C.V.Sabugo, C.V.babaçu e C.V.Casca.
- A área específica medida pelo método BET, é um parâmetro importante na determinação da reatividade do combustível.
- As cinzas contidas nos carvões vegetais possuem efeito catalítico sobre a reação de combustão em leito fluidizado.
- A velocidade superficial do gás (U entre 1,0 e 3,0 m/s) e a granulometria dos inertes constituintes no leito (0,25 a 0,54 mm) apresentam pouca influência sobre a taxa de queima.
- A diferença de reatividade entre a grafite e os carvões vegetais testados determina temperaturas diferentes para a transição do controle da combustão de cinético para difusional: para os carvões vegetais a transição ocorre próximo de 750°C, enquanto para a grafite a mudança ocorre próximo de 1000°C.
- A influência da concentração de oxigênio nos valores da taxa específica de queima é nitida para valores de temperatura nos quais ocorre o regime de controle difusional. Pode-se também concluir para a grafite que a influência da concentração de O_2 diminui com a temperatura, através da observação da convergência das curvas da taxa de queima para valores de temperaturas menores de 800°C, o que é coerente com o controle químico. Para carvões vegetais a temperatura para qual a pressão parcial de O_2 começa a ter menor influência sobre as taxas de queima deve estar por volta de 550°C.

c. A Influência do Leito de Inertes sobre a Taxa de Queima.

Mediu-se a perda de massa dos combustíveis devido ao atrito com o leito e comparou-se a taxa de queima obtida com e sem a presença do leito. Os resultados mostraram que:

- A perda de massa das amostras por efeito do atrito com os inertes do leito é uma função da velocidade do gás e da friabilidade do combustível;

- Não ocorre sinergia mensurável entre a reação de queima em leito fluidizado e a perda de massa das amostras devido ao atrito com o leito;

- Para temperaturas do leito acima de 850°C, a perda de massa por atrito é inferior a 3% da perda de massa pela reação de queima;

- Usando-se pré-aquecimento das amostras de combustível, verifica-se que a presença física do leito fluidizado não tem influência significativa sobre a taxa de queima dos combustíveis testados em relação aos valores obtidos na corrente só de gás. Isso se explica por se ter usado inertes não porosos para o material do leito.

Se a presença física do leito fluidizado não altera a taxa de queima, em relação a obtida numa corrente de gás (mantidas as condições de velocidade e temperatura do gás e a mesma concentração de oxigênio), então as correções para o número de Sherwood ($Sh = Km_c d/U$), apresentadas na Tabela 2.1, em função da porosidade do leito, deixam de ter sentido.

d. Devolatilização e queima dos Voláteis dentro do Leito Fluidizado.

Nos combustíveis vegetais a matéria volátil representa de 75 a 85% da massa e cerca de 50 a 60% do conteúdo energético. Há a necessidade de se conhecer os mecanismos que determinam sua evolução e queima dentro do leito.

A influência da presença física do leito fluidizado sobre o tempo de devolatilização foi analisada através de testes com e sem leito. Os testes sem leito foram realizados em um forno de tubo cilíndrico horizontal. Os testes foram realizados com a presença de escoamento de ar, com velocidade de 1,0 m/s.

Verificou-se que:

- O aumento do tempo de evolução dos voláteis é favorecido pelo aumento do tamanho e da densidade do combustível, e por menores temperaturas do leito.

- O aumento no tempo de evolução dos voláteis pela diminuição da temperatura de 100 a 200°C do leito não parece ser uma boa alternativa para melhorar a queima, pois a ignição dos voláteis requer temperaturas acima de 750°C.

- De maneira geral o tempo de devolatilização completa da biomassa é menor no leito fluidizado do que no forno tubular.

- A razão entre o tempo de devolatilização, com e sem a presença do leito fluidizado, sugere que a devolatilização é controlada pela transferência de calor para a superfície da amostra, no caso de combustível finamente dividido, e que o controle é difusional através da massa da amostra, para pedaços grandes de combustível.

- A queima dos voláteis dentro do leito é favorecida por aumentos na altura do leito, e pela maior velocidade de fluidização, promovendo melhor mistura e recirculação do combustível no leito.

- Para combustíveis com pequeno tamanho e baixa densidade, além dos problemas de se determinar as condições de operação do leito, para as quais pode ocorrer boa mistura, o problema da sua alimentação requer pesquisa adicional.

e. Considerações para Projeto

A geração e utilização de energia da combustão em leito fluidizado tem muitas aplicações, no entanto, podemos considerar duas situações que podem ser mais comuns: geração de energia térmica com extração direta de calor do leito e a geração de gás quente.

Para o primeiro caso é imprescindível que a queima ocorra internamente ao volume do leito. As condições para que isso ocorra são determinadas pelas relações entre:

- A densidade e a granulometria do combustível;
- O regime de fluidização expresso pela razão U/U_{mf} , onde o limite superior de U é determinado pelo nível de elutração de finos do leito e pelo excesso de ar desejado.

Para o segundo caso, a energia liberada dentro do leito deve ser suficiente para promover a ignição do combustível alimentado, aquecimento do gás de fluidização e manter a temperatura do leito

no valor desejado. Existe então maior liberdade para as condições de utilização do combustível e para o intervalo de velocidades de fluidização.

Para as duas situações, é importante conhecer a temperatura de transição do controle cinético para o controle difusional do combustível utilizado. Na condição de controle cinético, uma diminuição da temperatura do leito pode provocar uma queda muito brusca na taxa de queima e a perda da combustão. Na condição de controle difusional, a variação da temperatura é melhor tolerada.

Como uma extensão da pesquisa desenvolvida no presente trabalho evidenciam-se três tópicos merecedores de um estudo mais detalhado

- Estudo da transferência de massa em leito fluidizado borbulhante em função da capacidade de absorção massica das partículas que constituem o leito.

- Estudo da área superficial do combustível que efetivamente estaria exposta à reação de queima. Sugere-se como parâmetro de interesse nesta análise, a porosidade e a área específica do combustível, além da temperatura do meio, que pode alterar a profundidade da penetração de oxigênio no combustível através do controle de reação (cinético ou difusional).

- Revisão dos conceitos e hipóteses admitidos para a modificação do coeficiente de transferência de massa do combustível imerso em um meio gasoso estagnado ou em um leito fluidizado borbulhante.

REFERÊNCIAS

- Agarwal, P. K., Genetti, W.E., and Lee, Y.Y., 1984, "Model for Devolatilization of Coal Particles in Fluidized Beds", Fuel, vol 63, pp 1157-1165
- Andre, R., Guliurtlu, I., Jones, R., and Cabrita, I., 1989, "Characterization of Wood Combustion in a Fluidised Bed", Proceedings of the International Conference on Biomass for Energy and Industry, 3th E.C. Conference, vol 2, pp 2552-2556
- Anson, D., 1976, Progress in Energy Combustion Science, vol 2, pp 61-82 (citado de La Nauze 1985b)
- Arthur, J.R., 1951, "Reactions Between Carbon and Oxygen", Transactions of the Faraday Society, vol 47, pp 164-178
- Askes, P.J., and Doble, S.M., 1953, "A Note on the Critical Air Blast Test", Fuel in Science and Practice, vol 16, pp 359-360
- Avedesian, M.M., and Davidson, J.F., 1973, "Combustion of Carbon Particles in a Fluidised Bed", Transactions of the Institution of Chemical Engineers, vol 51, pp 121-131

-Barton, J R ,Poll, A J ,Webb, M ,Whalley, L , 1985,"Waste
Sorting and R D F Production in Europe", Elsevier Applied
Science Publishers.

-Baskakov, A.P., Berg, B.V ,Vier O K ,Phillippovsky, N F ,
Kiraskosyan, V.A ,Goldobin, J.M. and Suprun, V M., 1973,
Powder Technology,8,273. (citado de Botterill 1986)

-Basu, P , 1984, "Measuring of Burning Rates of Carbon Par
ticles in a Turbulent Fluidized Bed", International Confe
rence Fluidised Combustion Is It Achieving its Promise?,
DISC/3/17 - DISC/3/25

-Basu, P ,Broughton, J , and Elliot, D.E , 1975 , "Combustion
of Single Coal Particles in Fluidized Beds", Institute of
Fuel-Symposium-Series-nº-1-Fluidised-Combustion, vol I,pp
A3 1 - A3 10

-Boateng, A A.,Walawander, W P and Fan L T , 1989, "Devola
tilization Studies of Rice Hulls in a TGA and a Fluidized
Bed Reactor", Proceedings of the International Conference
on Biomass for Energy and Industry, 5-15 E.C. Conference,
vol 2, pp 2536-2540

-Botterill, J S M , 1975, "Fluid Bed Heat Transfer",
Academic Press

- Botterill, J.S.M., 1986, "Fluid Bed Heat Transfer", chapter 9 of Gas Fluidization Technology by Geldart D.

- Botterill, J.S.M., Butt, M.H.D., Cain, G.L., Chandrasekhar, R., Williams, J.R., 1967, in Drinkingburg International Symposium on Fluidization, Netherlands University Press, Amsterdam. (citado de Weinberg 1986)

- Botterill, J.S.M., Teomans, Y., and Yuregir, K.R., 1981, "Temperature Effects on the Heat Transfer Behaviour of Gas Fluidized Beds", American Institute of Chemical Engineers Symposium Series, 77, (208), 330-340

- Brewin, W. and Thompson, J.K., 1953, "The Critical Air Blast Test and Its Significance", Fuel In Science and Practice, vol 16, pp. 361-365

- Bukur, D.B. and Amundson, N.R., 1981, "Fluidized Bed Char Combustion Diffusion Limited Models", Chemical Engineering Science, 36, pp.1239-1256

- Calleja, G., Sarofim, A.F., and Georgakis, C., 1981, "Effect of Char Gasification Reaction Order on Bounding Solutions for Char Combustion", Chemical Engineering Science, vol 36, pp 919-929

- Caram, H. S. , and Amundson, N. R. , 1977, "Diffusion and Reaction in a Stagnant Boundary Layer about a Carbon Particle", Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, vol 16, pp. 171-181

- Chandran, R.R., and Duqum, J. N. , 1989, "Attrition Characteristics Relevant for Fluidized Bed Combustion", VI International Conference on Fluidization, Banff, Canada; pp 571-580

- Chakraborty, R.K. , and Howard, J. R. , 1980, "An Experimental Study of Mechanism of Combustion of Carbon in Shallow Fluidized Beds", Proceedings of International Fluid Conference, Henniker, NH, pp 167-174. Published by Plenum Press - New York

- Chakraborty, R.K. , and Howard, J. R. , 1981, "Combustion of Single Carbon Particles in Fluidized Beds of High Density Alumina", Journal of the Institute of Energy, march, pp. 55-58.

- Chen, T.P., Saxena, S.C. , 1977, "Mathematical Modelling of Coal Combustion in Fluidized Beds with Sulfur Emission Control by Limestone or Dolomite", Fuel, vol 56, 401-413

-Clift, R ,Ghadiri, M ,Monteiro, J L ,Tan, B.K C and Tambi
muther, K V., 1983,"Interphase Transfer and Interstitial
Flow in Bubbling Beds Inferred from Measurements of Aero
sol Capture", Proceedings of 4th International Conference
on Fluidization, pp 85-92, Engineering Foundation Confe
rence and Society of Chemical Engineers, Japan.

-Cranfield, R.R., and Geldart, D , 1974, "Large Particle
Fluidization", Chemical Engineering Science, 29, 935-945

-Cooke, M.J., 1984 , "Fluidized Bed Combustion for Burning
Biomass", Energy World, march pp 2-7

-Daly, T.A.,and Budge, C.F , 1974, "Reactivity of Chars from
New Zealand Coal". Fuel, vol 53, pp 8-11

-Davidson, J F ,Clift,R ,and Harrison, D.,1985, "Fluidiza
tion" , 2nd Edition-Academic Press

-Davidson, J.F ,and Harrison, D., 1963,"Fluidised Particles",
Cambridge University Press

-Field, M A ,Gill, D W.,Morgan, B.B., and Hawksley, P G W ,
1967, "Combustion of Pulverised Coal", Edited by Ihe Bri
lish Coal Utilization Research Association

-Fitzgerald, T. J., 1985, "Coarse Particle Systems" Chapter 12 of Fluidization, Edited by Davidson J. F., Clift R. and Harrison D. - Academic Press.

-Flamant, G., and Chraïbi, M., 1989, "Kinetic, Thermal and Chemical Attrition of Particles in Fluidized Bed", IV In International Conference on Fluidization, BANFF, Canada, pp 725-733, Edited Grace J.R., Shemilt L.W. and Bergounov M.A.

Frothing, N., 1938, Gerlands Beitr. Geophys., 52, pp. 170-216
(citado de La Nauze, 1985b)

-Franco, C., Gulyurtlu, I., and Cabrita, I., 1989, "Fluidized Bed Pyrolysis/Gasification of Forestry Residues at Temperatures Above 600°C to Produce Medium Calorific Value Gaseous Fuel", Proceedings of the International Conference on Biomass for Energy and Industry - 5th E.C. Conference, vol 2, pp. 2719-2723

-Geldart, D., 1972, Powder Technology, 7, 285
(citado de Geldart 1986)

-Geldart, D., 1986, "Gas Fluidization Technology" John Wiley & Sons - Chichester

-Gordon, A. L., and Amundson, N. R., 1976, "Modelling of Fluidized Bed Reactor - IV: Combustion of Carbon Particles", Chemical Engineering Science, vol 31, pp 1163-1178

- Gordon, A L ,Caran, H S.,and Amundson, N.R , 1978, "Modeling of Fluidized Bed Reactor - V: Combustion of Carbon Particles, an Extension", Chemical Engineering Science, vol 33, pp 713-722

- Gulyurtlu, I , and Cabrita, I., 1984, "Fluidised Bed Combustion of Forestry Wastes and Low-Quality coals", International Conference: Fluidized Combustion: Is It Achieving Its Promise?, DISC/11/80 - DISC/11/87

- Hampartsoumian, E ,Gibbs, B M., 1980, "Combustion of Peat in a Fluidised Bed", Fluidised Combustion: Systems and Applications, London, pp. IIB-3-1, IIB-3-9

- Highley, J., and Kaye, W.G., 1983, "Fluidized Bed Industrial Boilers and Furnaces", Chapter 3 of Fluidized Beds: Combustion and Applications, edited by Howard, J R - Applied Science Publishers

- Howard, J R., 1983, "Fluidized Beds: Combustion and Applications", Applied Science Publisher - England

- Hoy, H R , and Kaye, W.G , 1979, "By the NCB on the Development of Atmospheric and Pressurized Fluidized Bed Combustion", Power from Coal, Conf. London, U K, Institute of Mechanical Engineers, 1-10.

- Hippo, E , and Walker, Jr P L , 1975, "Reactivity of Heat Treated Coals in Carbon Dioxide at 900°C", *Fuel*, vol 54, pp 245-248

- Hugot, E , 1977, "Manual da Engenharia Açucareira", Editora Mestre Jou - São Paulo.

- Kanury, A.M , 1977, "Introduction to Combustion Phenomena", Gordon and Breach Science Publishers

- Khitrin, L.N , and Golovina, E S , 1964, *High Temperature Technology*, 485-496, Butterworths. (citado de Field, Gill, Morgan and Hawkesley/1967)

-

- Kreith, F., 1977, "Princípios da Transmissão de Calor", Edgard Blucher

- Kunii, D., and Levenspiel, C., 1969, "Fluidization Engineering", John Wiley, New York.

- La Nauze, R D , 1980, "Fluidised Combustion Systems and Applications", of Fluidised Combustion Systems and Applications, London, Institute of Energy, pp KA-1, KA-15

- La Nauze, R D , 1982, "Coal Devolatilization in Fluidized Bed Combustors", *Fuel*, vol 61, 771-774

-La Nauze, R.D , and Jung, K , 1982a, 19th Symposium (Int) on Combustion, pp 1087-1092, Combustion Institution, Pittsburgh, Pennsylvania. (citado de La Nauze - 1985)

-La Nauze, R.D , and Jung, K , 1982b, Proceedings of 7th International Conference on Fluidized Combustion - Philadelphia (citado de Weinberg 1986)

-La Nauze, R.D. and Jung, K , Kastl, J , 1984, "Mass Transfer to Large Particles in Fluidised Beds of Smaller Particles", Chemical Engineering Science, vol 39, pp. 1623-1633.

-La Nauze, R.D , 1985a, "Fundamentals of Coal combustion in Fluidised Beds", Chemical Engineering Research and Design, vol 63, pp. 3-33.

-La Nause, R D., 1985b, "Fundamentals of Coal Combustion", pp. 631-674 of Fluidization, edited by Davidson, Clift and Harrison - 1985

-La Nause, R.D., 1987, "A Review of the Fluidized Bed Combustion of Biomass", Journal of the Institute of Energy, June, pp 66-76

-Lenz, G R , Ramos, B W , 1985, "Combustíveis Fósseis Sólidos no Brasil. Carvão, Lignite, Turfa e Rochas Oleíneas", Principais Depósitos Minerais do País, vol 1, pp 3-37

-Lestani, J L , Sayão, L J C , Silberman, T D A , Ferreira, E M B , 1988, "Termelétricas à Lenha", Brasil-Europa-Seminário de Energia de Biomassa e Resíduos/Comissão das Comunidades Europeias/INEP/CEMIG

-Lewis, W K., Gilliland, E R., and Paxton, R.R., 1954, "Low Temperature Oxidation of Carbon", Industrial and Engineering Chemistry, vol 46, pp 1327-1331

-Lewis, J B., and Partridge, B.A., 1967, "Fluidization", Nature, vol 16, p 124-127

-Makansi, J . 1990, "Fluidized Bed Technology Expands Options for Solid Fuel Firing", Power, June, pp 25-38.

-Masson, H.A., Rios, C.M., Dang Tran, K., and Bourtembourg, 1983, "Shape and Density Effects on the Behaviour of a Large Isolated Body Moving in a Gas Solid Fluid Bed", Proceedings of 4th International Conference on Fluidization, Kasukojima, Japan, pp 185-193

-Masson, H A , 1985, "Fluidized Bed Combustion of RDF and Biomass Pellets", Proceedings of 8th International Conference on Fluidized Bed Combustion, vol 2, pp 1058-1067

-Masson, H A , 1986, "Fuel Circulation and Segregation in F B C ", pp 185-210 of Fluidized Bed Combustion, edited by Radovanovic, M

-Merrick, D., and Highley, J., 1974, "Particle Size Reduction and Elutriation in a Fluidized Bed Process", American Institute of Chemical Engineers Symposium Series, 70 (137), pp.366-378

-Motta, J.F.M., Nakano, S., Shimada, H., Nucci, O., Milko, P., Coelho, J.C.M., 1982, "Turfa: Experiência do IPT nos Campos Geológico e Tecnológico", Energia, vol.IV, 23, pp.32-43.

-Mulcahy, M.F.R., and Smith, I.W., 1969, "Kinetics of Combustion of Pulverized Fuel: A Reviews of Theory and Experimental", Reviews of Pure and Applied Chemistry, vol 19, pp.81-108

-Nienow, A.W., and Chiba, T., 1985, "Fluidization of Dissimilar Materials" chapter 10 of Fluidization 2nd Edition, edited by Davidson J.F., Clift R. and Harrison D., Academic Press.

-Nack, H., Kiang, K.D., Liu, K.T., Murthy, K.S., Smithson, G.R., and Oxley, J.H., 1976, "Fluidization Technology", First International Conference on Fluidization, Asilomar, edited by Kearns D.L., vol.II, pp. 339-378

-Olofsson, J., 1980, "Mathematical Modelling of Fluidised Bed Combustion", IEA Coal Research, London and National Swedish Board for Energy Source Development, Spanga

-Park, D., and Lee, J. K., 1989, "Combustion of Anthracite Particles in a Fluidized Bed", Fuel, vol. 68, pp. 1180-1183

-Park, D., Levenspiel, O., and Fitzgerald, T. J., 1981, "Plume Model for Large Particles Fluidized Bed Combustors", Fuel, vol. 60, pp. 295-306

-Pillai, K. K., 1981, "The Influence of Coal Type on Devolatilization and Combustion in Fluidized Beds", Journal of the Institute of Energy, September - pp. 142-150

-Pillai, K. K., 1985, "Devolatilization and Combustion of Large Coal Particles in a Fluidized Bed", Journal of the Institute of Energy, March 3-7.

-Prins, W., Casteleijn, T. P., Draijer, W., and van Swaaij, W. P. M., 1985, "Mass Transfer from a Freely Moving Single Sphere to the Dense Phase of a Gas Fluidized Bed of Inert Particles", Chemical Engineering Science, vol. 40, 3, pp. 481-497.

-Prins, W., Siemons, R., and van Swaaij, W. P. M., 1989, "Devolatilization and Ignition of Coal Particles in a Two-Dimensional Fluidized Bed", Combustion and Flame, vol. 75, pp. 57-79

-Radovanovic, M., 1986, "Fluidized Bed Combustion", Hemisphere Publishing Corporation

-Rowe, J W , and Cooper, J R , 1977, "Technical Data on Fuel", edited by The British National Committee - World Energy Conference

-Ross, I B , 1979, "The Efficiency of Fluidised Bed Combustion" Phd Dissertation University of Cambridge, U K

-Ross, I B ,and Davidson, J F , 1982, "The Combustion of a Carbon Particle in a Fluidised Bed", Transactions of the Institution of Chemical Engineers, vol 60, pp 108-114

-Rowe, P N , and Masson, H A , 1981, "Interaction of Bubbles with Probes in Gas Fluidised Beds", Transactions of the Institution of Chemical Engineers, vol 59, pp 177-185

-Rowe, P N ,Claxton, K T ,and Lewis, J B., 1968, "Heat and Mass Transfer from a Single Sphere in a Extensive Flowing Fluid", Transactions of the Institution of Chemical Engineers, vol 46, T14 T31.

-Salam, T.F ,Shen, X L , and Gibbs, B M . 1988, "A Technique for Determining Devolatilization Rates of Large Coal Particles in a Fluidised Bed Combustor" Fuel, vol 67, pp. 414-419

-Salatino, P , and Maximilla, L , 1980 "A Descriptive Model of Carbon Attrition in the Fluidized Combustion of a Coal Char", Chemical-Engineering-Science, vol 40, n^o 10, pp 1905-1916

-Santos, F J , 1981, "Combustão Fluidizada de Carvão Mineral e Combustíveis Vegetais" Tese de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas São Paulo

-Saxena, S.C , Grewal, N S , Venkataramana, N , 1978, "Modelling of a Fluidized Bed Combustion With Immersed Tubes" , University of Illinois , Report to US Dept of Energy

-Skinner, D.G , 1970, "Fluidised Combustion of Coal", edited by National Coal Board, U K

-Smith, I.W , 1942, 18th-Symposium-Combustion, pp 1045-1065, Combustion Institute, Pittsburg, Pennsylvania (citado de La Nause 1985b)

-Souza Santos, M L , 1987, "Modelling and Simulation of Fluidised Bed Boilers and Gasifiers for Carbonaceous Solids", PhD Thesis, University of Sheffield - UK

-Spalding, D.B , 1979, "Combustion and Mass Transfer", Pergamon Press

-Spiers, H.M. , 1955 "Technical Data on Fuel", edited by The British National Committee, World Power Conference, London U.K

-Stubington, J.F. , 1980, "The Role of Coal Volatiles in Fluidized Bed Combustion", Journal of Institute of Energy, December, pp 191-195

-Stubington, J.F. , and Sumaryono, 1984, "Release of Volatiles from Large Coal Particles in a Hot Fluidized Bed", Fuel, vol 63, pp 1013-1019

-Syromyatnikov, N.I. , Kulikov, V.M. , and Korolev, V.N. , 1977, "Structural and Hydrodynamic Conditions of Fuel Combustion in a Low Temperature Fluidized Bed", Journal of Institute of Fuel, 40S, pp.169-171

-Takeuchi, H. , Deguchi, A. , Hosoda, H., and Hirama, T. , 1985, "Influence of Coal Attrition on Combustion Efficiency in a Fluidized Bed", Fluidization 85 , Chionajako-Sembo-Shing - Science Press, pp 307-317

-Tan, A.D., and Stott, J.B. , 1989, "Fluidized Bed Differential Thermal Analysis of Wood", Fuel, vol 68, pp 1275-1279

-Thiele, E W , 1939, "Relation Between Catalytic Activity and Size of Particle", Industrial and Engineering Chemistry, vol 31, pp. 916-920

-Turkdogan, E T., Olsson, R G , and Vinters, J.V., 1970, "Pore Characteristics of Carbons", Carbons, vol 8, pp 545-564.

-Turkdogan, E T , and Vinters, J V , 1972, "Catalytic Oxidation of Carbon", Carbon, pp. 97-111.

-Valk, M , 1986, "Fluidized Bed Combustion", pp 7-36 of Fluidized Bed Combustion, edited by Radovanovic M , Hemisphere Publishing Corporation

-Valk, M , Radovanovic, M., and Alblas, B., 1986, "the Influence of Fly Ash Recycling on Combustion", pp 156-164 of Fluidized Bed Combustion, edited by Radovanovic M., Hemisphere Publishing Corporation.

-van Swaaij, W.P.M., and Prins, W , 1986, "Fundamentals of Fluidization", pp.87-114 of Fluidized Bed Combustion, edited by Radovanovic M.

-van Heerden, C., Nobel, A P P., and van Krevelen, D W , 1959, "Mechanism of heat Transfer in Fluidized Beds", Industrial and Engineering Chemistry, vol 45, pp. 1237-1242

Vaux, W C , and Kearns, D L , 1980, in Fluidization, edited by Grace, J R , e Matsen J M , pp 437-444 , Plenum Press , New York. (citado de La Nauze 1985a)

-Virt, M J , 1983, "Fluidized Bed Heat Recovery Systems", Chapter 11 of Fluidized_Beds_Combustion_and_Applications, edited by Howard J R

-Vleeskens, J M., and Ross, M , 1989, "Attrition of Chars in Fluidized Bed Combustion", Fuel, vol 68, pp 325-328

-Walker, Jr P L , Rusinko, Jr F , and Austin, L G , 1959, "Gas Reactions of Carbon", Advances_in_Catalysis, 11, pp.133-221

-Waters, P L , 1975, Institute of Fuel. Symposium Series (London), vol.1, C6.1-C6-12 (citado de La Nauze 1985b)

-Weinberg, F J., 1986, "Advanced Combustion Methods" Academic Press

-Wildegger-Gaismaier, A.E , and Aghajani, P.K , 1990, "Drying and Devolatilization of Large Coal Particles under Combustions Conditions", Fuel, vol 69, pp 44-52

-Young, B C , and Smith, I W , 1981, 18th Symposium (Int) Com bustion,pp 1245-1255, Combustion Institute, Pitts burgh, Pennsylvania. (citado de La Nauze 1985a)

-Zabrodsky S.S , 1966, "Hydrodynamics and Heat Transfer in Fluidized Beds", The M.I.T.Press