

ADSORÇÃO DE GASES SULFUROSOS
EM LEITO FLUIDIZADO DE
CARVÃO ATIVADO

medo de não ser aprovada por Katia Tannous em 20/03/89
Cesar Santana

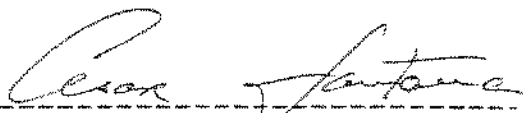
UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia de Campinas
Engenharia Química

" ADSORÇÃO DE GASES SULFUROSOS EM LEITO
FLUIDIZADO DE CARVÃO ATIVADO"

Autor: Katia Tannous

Tese submetida a comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Campinas - UNICAMP como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de "MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA"

Aprovada por:


Prof. Dr. César Costapinto Santana
(Orientador)


Prof. Dr. Sandra Cristina S. Rocha


Prof. Dr. Lúcia Helena I. Mei

Campinas - SP - Brasil
30 de março de 1989

Pergunte a qualquer um na massa de gente obscura: qual o propósito da existência das coisas? A resposta geral é que todas as coisas foram criadas para o nosso auxílio e uso prático! [...] Em resumo, todo o cenário magnífico das coisas é diária e confiantemente visto como destinado, em última instância, à conveniência peculiar do gênero humano. Dessa forma, o grosso da espécie humana arrogantemente se eleva acima das inumeráveis existências que o cercam.

G. H. Toulmin, *The Antiquity and Duration of the World* [A antiguidade e duração do mundo, 1780, ed. de 1824] pp.51-2.

Aos meus pais,

Adla e Aref

e

as minhas irmãs,

Nádia e Leila

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor César Costapinto Santana, meu sincero agradecimento pela orientação e oportunidade de desenvolver este trabalho.

Aos professores do Laboratório de Desenvolvimento de Processos em Sistemas Particulados, pela colaboração e amizade.

Ao Laboratório de Processos Químicos, pela montagem do analisador de gás.

Aos funcionários da vidraria do Instituto de Química, Sr. Arlindo Furquin, Luiz Euclides Fontana e Cláudio Roberto Roque, pelos acessórios em vidro.

A Raquel Cocatto Ribeiro, pela orientação na aquisição de material didático nas bibliotecas.

A Eliana Ribeiro da Silva, pelos empréstimos de materiais de laboratório.

Ao José Roberto Rosa, pela elaboração dos desenhos que compõe deste trabalho.

Aos amigos e colegas de trabalhos, pelo apoio e amizade "As Guriás", pelo dia a dia.

E a todos aqueles que contribuíram, mesmo indiretamente, para a realização deste trabalho.

ÍNDICE

RESUMO	1
ABSTRACT	ii
NOMENCLATURA	iii
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
I.1 - Motivação à pesquisa	2
I.2 - Objetivos deste trabalho	5
CAPÍTULO II - REVISÃO DA LITERATURA	6
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	12
III.1 - DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO ANALÍTICO PA- RA ANÁLISE DO DIÓXIDO DE ENXOFRE(SO ₂)	13
III.1.1 - Introdução	14
III.1.2 - Aspectos gerais	15
III.1.2.1 - Propriedades físicas	15
III.1.2.2 - Reações químicas	15
III.1.2.3 - Efeitos do dióxido de enxofre	16
III.1.3 - Métodos de análise do dióxido de enxofre ..	18
III.1.3.1 - Revisão bibliográfica	18
III.1.3.1.1 - Determinação colorimétrica	19
III.1.3.1.2 - Determinação eletrocondutimétrica	22
III.1.3.1.3 - Determinação coulométrica	23
III.1.3.1.4 - Determinação espectrofotométrica	24
III.1.3.1.5 - Determinação cromatográfica à gás	25
III.1.4 - Método colorimétrico (iodometria) para análise do dióxido de enxofre(SO ₂)	27
III.1.4.1 - Reagentes utilizados	27

III.1.4.2 - Procedimento experimental para a solu-	
ção de amostragem	27
III.1.4.3 - Descrição do equipamento	28
III.1.4.4 - Procedimento operacional	30
III.1.4.5 - Montagem experimental do analisador	31
III.2 - ASPECTOS EXPERIMENTAIS DA ADSORÇÃO	33
III.2.1 - Introdução	34
III.2.2 - Montagem experimental	36
III.2.3 - Preparação do leito fluidizado	39
III.2.3.1 - Escolha do tipo de distribuidor	39
III.2.3.2 - Montagem e especificação da placa po-	
sa	40
III.2.3.3 - Instalação do leito fluidizado	41
III.2.3.4 - Seleção do material apropriado	42
III.2.3.5 - Preparação do carvão ativado	43
III.2.4 - Aspectos experimentais da dinâmica da	
fluidização	44
III.2.4.1 - Descrição do equipamento	44
III.2.4.2 - Procedimento operacional	45
III.2.5 - Aspectos experimentais da adsorção do	
díóxido de enxofre	47
III.2.5.1 - Descrição do equipamento	47
III.2.5.2 - Procedimento operacional	47
CAPÍTULO IV - CÁLCULOS DOS PARÂMETROS ENVOLVIDOS E RESULTA-	
DOS EXPERIMENTAIS	50
IV.1 - Método colorimétrico (Iodometria)	51
IV.1.1 - Dados experimentais	51
IV.1.2 - Curva de calibração	55

IV.2 - Parâmetros envolvidos no sistema de adsor-	
ção	58
IV.2.1 - Cálculo das variáveis no sistema fluido-	
dinâmico	58
IV.2.1.1 - Determinação da altura do leito	58
IV.2.1.2 - Determinação da massa de sólido	58
IV.2.1.3 - Determinação da vazão	59
IV.2.1.4 - Determinação da queda de pressão	59
IV.2.1.5 - Determinação do tamanho de partícula	59
IV.2.1.6 - Determinação da densidade aparente	60
IV.2.1.7 - Determinação da porosidade do leito	60
IV.2.1.8 - Dados experimentais e representação grá-	
fica	61
IV.2.2 - Cálculo das variáveis para a cinética de	
adsorção num ciclo fechado	73
IV.2.2.1 - Determinação do número de moles adsor-	
vido	73
IV.2.2.2 - Determinação do número de moles adsor-	
vido por massa de adsorvente e tempo de	
adsorção	74
IV.2.2.3 - Determinação do acúmulo do número de	
moles adsorvido por massa de adsorvente	
a cada ciclo	74
IV.2.2.4 - Determinação da relação da fração molar	
a cada ciclo e a inicial	74
IV.2.2.5 - Determinação do acúmulo total adsor-	
vido	75
IV.2.2.6 - Dados experimentais e representação grá-	
fica	75

IV.2.2.7 - Determinação dos dados cinéticos	88
IV.2.2.8 - Determinação dos dados cinéticos para um ciclo fechado de adsorção	95
IV.2.2.9 - Dados experimentais e representação grá- fica	98
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	103
V.1- CONCLUSÓES	104
V.1.1 - Análise do método analítico colorimétrico ..	104
V.1.2 - Análise do comportamento dinâmico do leito fluidizado	104
V.1.3 - Análise dos dados cinéticos	105
V.2 - Sugestões	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

RESUMO

O processo de adsorção de gases sulfurosos, na superfície de sólidos, é um dos métodos mais importantes para controle ambiental da emissão de gases de combustão.

Neste trabalho foi efetuado um estudo, em escala de bancada de laboratório, da adsorção em superfícies de carvão ativado utilizando misturas padrões de gases.

O equipamento foi projetado e construído em vidro, de modo a visualizar o comportamento do leito fluidizado em face ao escoamento de gases. O sistema foi acoplado a instrumentos usuais de medidas de vazão e pressão.

No sistema de adsorção foram coletados dados macroscópicos da cinética de adsorção num ciclo fechado, à temperatura ambiente. Um modelo matemático é proposto, visando caracterizar os efeitos de transferência de massa para o sólido.

Os resultados foram satisfeitos, assumindo algumas hipóteses fundamentais para obtenção da isoterma de adsorção linear.

Aspectos importantes para a interpretação dos dados cinéticos, como a massa de sólidos, concentração do gás a cada passagem pelo sólido, taxa de escoamento e diâmetro de partícula, foram evidenciados neste trabalho.

Um sistema de amostragem para análise do gás dióxido de enxofre foi montado, a partir da titulação dos gases com uma solução de Iodo/Iodeto de Potássio. Através de uma curva de calibração, a concentração do gás mostrou-se ser proporcional ao tempo de descoloramento da solução.

ABSTRACT

The sulfurous gas adsorption process in solids surfaces is one of the important methods of environmental control concerning to combustion gases emission.

In this work, it was carried out a study on the adsorption in surface of activated carbon, in laboratory scale, using standard gas mixture.

The equipment was designed and built in glass, in order to visualize the fluidized bed behavior in face of the gas flowing. The system was connected to usual pressure and flow measure devices.

Macroscopic data of the adsorption kinetics in a closed cycle were collected in the adsorption system, at room temperature. A mathematical model was proposed, viewing to characterize the effects of mass transfer to the solid.

Assuming some fundamental hypothesis in order to obtain a linear adsorption isotherm, the results were very satisfactory.

Important aspects to the interpretation of the kinetics data, such as solid mass, gas concentration at each passage through the solid, flow rate, particle diameter were showed out in the present work.

A sample system, in order to analyse the sulfur dioxide, was built using titration of the gases with a solution of iodine/potassium iodide. By means of a calibration curve the gas concentration showed out as being proportional to the solution decoloring time.

NOMENCLATURA

a e b	- Parâmetros da isoterma de adsorção, segundo Langmuir
A	- Área da seção transversal do tubo, cm^2
c	- Número de moles do gás presente no leito por unidade de massa do sólido, mol/g
d_t	- Diâmetro do tubo, cm
DHa	- Deflexão no fluxímetro capilar para o ar, cm
DHl	- Deflexão manométrica do leito de sólido, cm
DHm	- Deflexão no fluxímetro capilar para a mistura padrão, cm
DHma	- Deflexão no fluxímetro capilar para a mistura padrão + ar, cm
DHp	- Deflexão manométrica da placa distribuidora, cm
DHpl	- Deflexão manométrica da placa distribuidora+do leito de sólido, cm
D_p	- Diâmetro médio das partículas, cm
Gm	- Vazão molar do gás, mol/s
L	- Altura do leito, cm
L_0	- Altura inicial do leito, cm
Ms e W	- Massa de sólido, g
n_{ads}	- Número de moles adsorvido à cada ciclo, mol
n_t	- Número de moles totais por unidade de tempo, mol/s
N	- Número de ciclos que ocorre o contato gás-sólido
ΔP	- Queda de pressão no leito de sólido, dina/cm^2
Q	- Vazão volumétrica do sistema, cm^3/s
Q_a	- Vazão volumétrica do ar, cm^3/s
Q_m	- Vazão volumétrica da mistura padrão, cm^3/s
Q_{ma}	- Vazão volumétrica da mistura padrão+ar, cm^3/s

- $Re =$ - Número de Reynolds = $v \cdot d_t \cdot \rho / \mu$
 t - Tempo inicial do vapor no gás de saída do leito, s
 t_c - Tempo de contato gás-sólido, s
 t_d - tempo de descoloramento da solução, min
 T - Tempo total do experimento, s
 v - Velocidade de escoamento, cm/s
 V - Volume total do equipamento, cm³
 $V_{sólidos}$ - Volume de sólidos no leito, cm³
 V_{total} - Volume de total do leito, cm³
 V_{vazios} - Volume de vazios no leito, cm³
 y, y_1, y_2 - Frações molares do gás após o leito à cada ciclo
 y_n - Fração molar final do gás detectada
 y_0 - Fração molar do gás na entrada do leito
 y^* - Fração molar do gás presente na mistura padrão
 y_{50} - Fração molar do gás adsorvido
 Y - Número de moles adsorvido por unidade de massa de adsorvente, mol/g
 Z - $1/y^*$

 ϵ - Porosidade
 ρ - Densidade do gás (ar), g/cm³
 ρ_s - Densidade do sólido, g/cm³
 μ - Viscosidade do gás (ar), g/cm*s

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

I.1 - MOTIVAÇÃO À PESQUISA

Um dos problemas mais preocupantes dos países industrializados é, sem dúvida, a poluição do meio ambiente.

Entre os inúmeros poluentes expelidos na atmosfera, os gases sulfurosos são os mais conhecidos. Eles provêm da queima dos combustíveis fósseis (petróleo, carvão), bem como das rejeições das indústrias químicas.

Com o objetivo de preservação do habitat e um maior aproveitamento da matéria-prima surge alguns métodos industrializados para a remoção destes gases. Um dos principais métodos é a adsorção em leitos (fixos, fluidizados, recirculantes) de sólidos.

Países como Japão, Alemanha Ocidental e Estados Unidos desenvolveram e patentearam os processos de dessulfurização, com o interesse de aproveitar ao máximo todo gás desperdiçado.

Na década dos anos 50, surgiu na Alemanha, o primeiro processo industrial, chamado Processo Reinluft(1). O processo consiste na adsorção e regeneração em leitos de carvão circulante e sucessivas etapas de concentração com os gases, até a obtenção de níveis convenientes de 25-30% em volume.

Seguindo as atividades do Reinluft, na década de 70, a tecnologia de adsorção em carvão foi avançada através do processo chamado Bergbau-Forschung(2), desenvolvido em Luenen na Alemanha. Esse processo consiste em três seções básicas: adsorção, regeneração (desorção) e uma unidade Claus (tratamento de saída do gás rico em SO_2). O processo investiga o comportamento dos óxidos de nitrogênio e a retenção de cinzas volantes.

Nos Estados Unidos, a Foster-Wheeler(3) constrói uma unidade licenciada pela Bergbau-Forschung, onde utiliza três se-

ções principais: adsorção, regeneração e Resox (tratamento do gás de saída para a produção do enxofre elementar).

Outro projeto foi desenvolvido no Japão pela Companhia de Máquinas e Construção Naval Sumimoto e a Companhia de Energia Elétrica Kansai(1). Esse processo emprega o efeito da adsorção em fluxo cruzado como Processo Bergbau-Forschung e o de regeneração como Processo Reinluft.

Com a necessidade de desenvolver novos métodos e processos surge o processo chamado Westvaco(4), que utiliza leitos fluidizados de múltiplos estágios, nas etapas de adsorção e desorção, empregando carvão ativado.

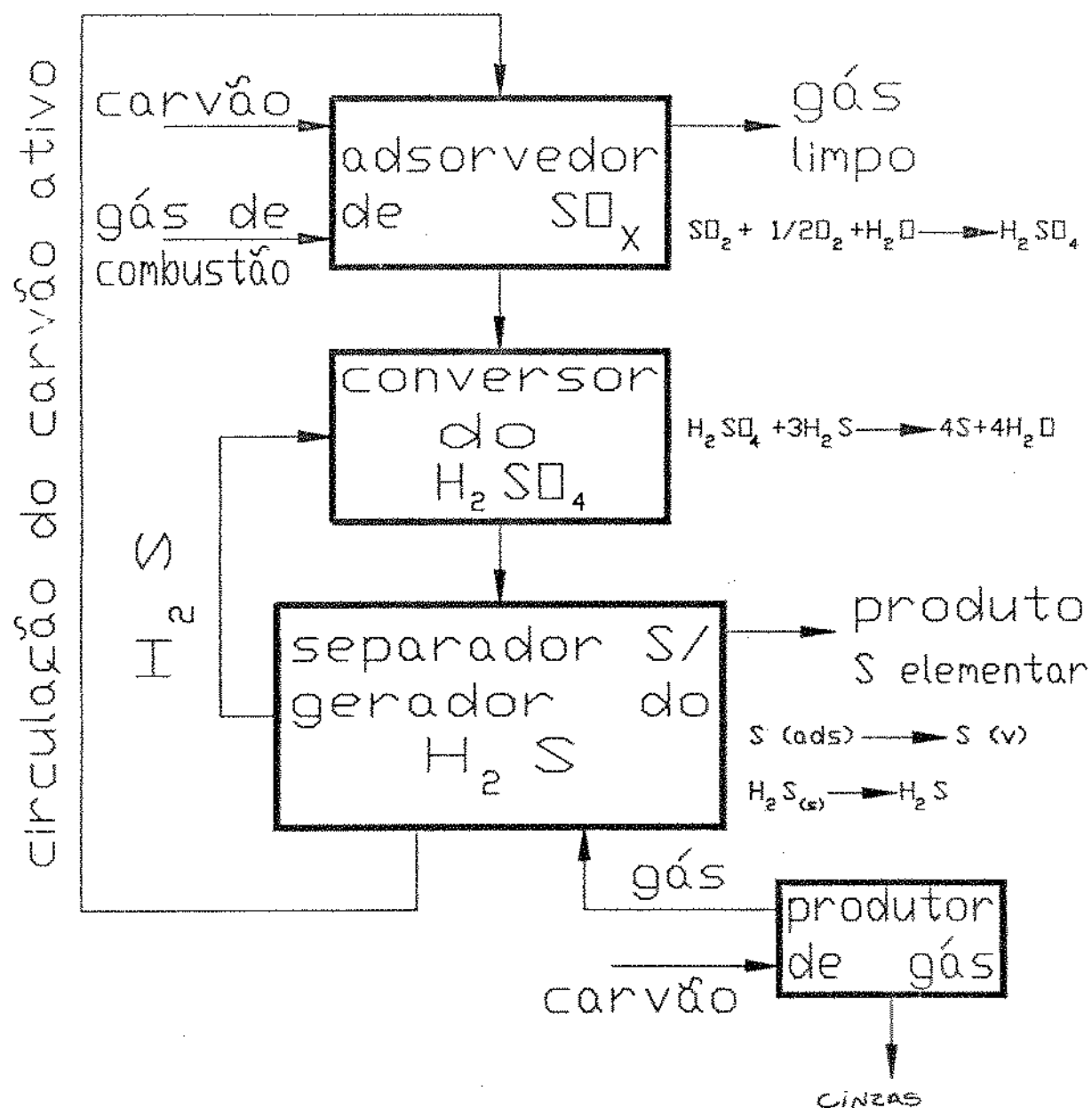
O processo Westvaco, mostrado na figura 1, é um processo altamente eficiente para a remoção do dióxido de enxofre(SO_2) e regenera economicamente o carvão ativado, enquanto produz como produto secundário o S elementar.

No entanto, observa-se na literatura uma grande escassez de dados, que permitam prever com segurança e confiabilidade o comportamento de leitos fluidizados nos processos de dessulfurização.

O presente trabalho tem a finalidade de contribuir para desenvolvimento de métodos de cálculo aplicáveis a um processo simples e rápido de adsorção do gás dióxido de enxofre(SO_2), visando o controle ambiental e a produção de substâncias de valor comercial, como o enxofre elementar e o ácido sulfúrico.

Esta pesquisa tem características de abertura de uma linha de ação experimental, onde a obtenção de dados básicos auxiliem ao projeto de equipamento de unidades de dessulfurização em fase gasosa pelo contato com superfícies sólidas.

Figura 1 - PROCESSO WESTVACO



1.2 - OBJETIVOS DESTE TRABALHO

O presente trabalho tem por objetivo estudar a adsorção do gás dióxido de enxofre(SO_2) na superfície de carvão ativado, num leito fluidizado, visando obter uma análise macroscópica dos dados cinéticos de adsorção.

A interpretação destes dados foi baseada nos modelos tradicionais e simplificados de adsorção física existentes na literatura, com a adoção de um método dinâmico de análise experimental.

Como um estudo preliminar foram necessários a obtenção de alguns parâmetros fluidodinâmicos e o desenvolvimento de um método analítico para análise do gás dióxido de enxofre(SO_2).

CAPÍTULO II - REVISÃO DA LITERATURA

Nos últimos anos um grande número de trabalhos tem sido publicado sobre o comportamento de sistemas gás-sólido fluidizados. No entanto, poucos relatam os aspectos de aplicação, referentes às características de adsorção em fase gasosa, visando o cálculo de equipamentos para viabilizar a remoção de gases sulfurosos.

A técnica do processo de adsorção em adsorventes sólidos com alto potencial de retenção, tem sido um assunto polêmico de algumas investigações.

Alguns autores, como Amundson(5), apresentam modelos matemáticos para o tratamento do leito fluidizado funcionando como adsorvedor, exigindo a determinação dos parâmetros básicos da formulação, por via experimental.

Richardson e Bakhtiar(6), em 1958, determinaram a taxa de transferência de massa de vapores em partículas sólidas fluidizadas. Com a adsorção de vapores de tolueno e iso-octano de uma corrente de ar, por microesferas de alumina sintética, determinaram a concentração de saída do vapor, usando um analisador sônico.

Os efeitos da variação de massa de sólido, da concentração de saída do vapor em função do tempo, taxa de escoamento e o diâmetro da coluna, são analisados em função do coeficiente de transferência de massa.

A figura 2 caracteriza as hipóteses admitidas, onde y e y_0 correspondem às frações molares do vapor de entrada e saída, G_m é a vazão molar do gás, W é massa de sólido no leito e t é o tempo inicial do vapor no gás de saída do leito.

O comportamento do sistema foi testado e comprovado para o efeito de desorção, mostrando-se qualitativo.

Os resultados desta investigação forneceram as seguintes conclusões:

- Não há diferença no comportamento dos leitos de sólidos, quanto à utilização de massas constantes de sólido;
- O gás e o sólido atingem rapidamente o equilíbrio, impossibilitando obter os coeficientes de transferência, supostamente constante.

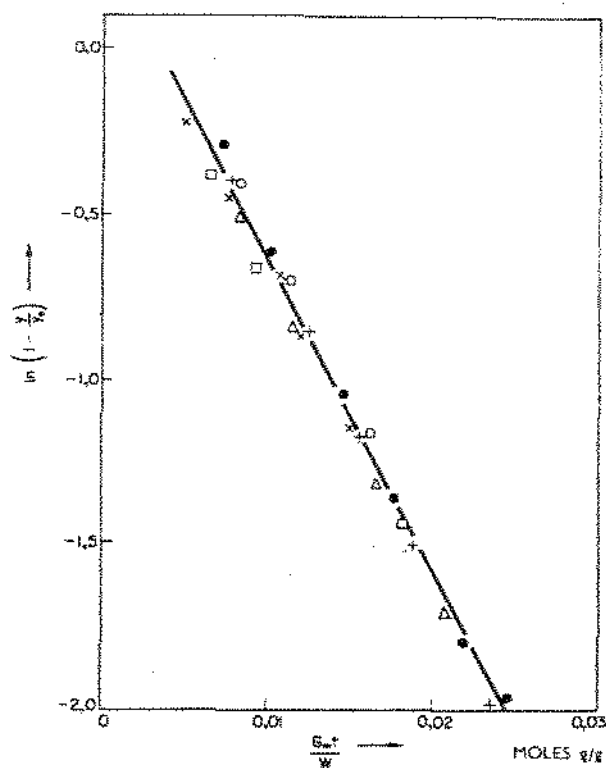


FIGURA 2 - Adsorção de vapor de iso-octano sobre microesferas de sílica-alumina

Um dos trabalhos mais completos sobre a presente pesquisa é aquele devido a Fraser(7), em 1971, onde propõe um estudo de adsorção do dióxido de enxofre(SO_2) numa variedade de superfícies particuladas, em presença de outros gases contaminantes.

As concentrações utilizadas, do gás dióxido de enxofre (SO_2), são aquelas encontradas na atmosfera ou nas chaminés dos processos de combustão. No entanto, o tamanho de partículas sólidas empregadas são maiores daquelas existentes no meio.

As quantidades do gás traçador(S^{35}O_2) são introduzidas num sistema fechado, em presença de um leito fluidizado à uma temperatura constante. O gás entra em contato com o leito de sólido e, após várias passagens, mede-se a concentração do gás no equilíbrio com o sólido, por detectores GM.

Os adsorventes utilizados e os contaminantes adicionados ao gás dióxido de enxofre(SO_2) estão listados na tabela 1.

A tabela 2 mostra a ordem de eficiência de adsorção do dióxido de enxofre(SO_2) em presença dos contaminantes.

A análise conclusiva deste trabalho é dirigido pelo seguintes pontos:

- Aumento da adsorção do dióxido de enxofre (SO_2) em presença de diferentes substâncias e outros gases, devido ao aumento da área superficial;

- Possibilidade de haver uma adsorção química do dióxido de enxofre e a superfície das partículas para a temperatura de 65°C .

TABELA 1

CONDIÇÕES DE TESTE

FATOR	MATERIAL	NÍVEL
Substratos	esferas de vidro	1,0 m ²
	cinzas	8,1 m ²
	Grafite	24 m ²
	Zeólitos	250 m ²
	Carvão ativado	1860 m ²
Temperaturas	Baixa	28°C
	Alta	65°C
Contaminantes	dióxido de nitrogênio	300 ppm
	dióxido de carbono	200 ppm
	monóxido de carbono	30 ppm
	buteno-1	10 ppm
	vapor de água	58% U.R.
	atmosfera seca	1500 ppm(água)
Gás em teste	dióxido de enxofre	1-50 ppm

TABELA 2

ORDEM CRESCENTE NA EFICIÊNCIA DO SUBSTRATO PARA A ADSORÇÃO
DO DIÓXIDO DE ENXOFRE EM PRESENÇA DE VÁRIOS CONTAMINANTES

T(°C)	SO ₂	+NO ₂	+CO ₂	+CO	+buteno-1	58%U.R.
28	carvão ativado	esferas de vidro	carvão ativado	carvão ativado	zeólito	carvão ativado
	zeólito	zeólito	zeólito	zeólito	cinzas	zeólito
	grafite	grafite	cinzas	cinzas	carvão ativado	esferas de vidro
	esferas de vidro	carvão ativado	esferas de vidro	esferas de vidro	grafite	cinzas
65	carvão ativado	zeólito	carvão ativado	carvão ativado	carvão ativado	esferas de vidro
	zeólito	carvão ativado	zeólito	zeólito	zeólito	zeólito
	grafite	grafite	esferas de vidro	grafite	grafite	cinzas
	esferas de vidro	esferas de vidro	grafite	cinzas	cinzas	grafite
	cinzas	cinzas	cinzas	esferas de vidro	esferas de vidro	carvão ativado

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

III.1 - DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO ANALÍTICO PARA
O DIÓXIDO DE ENXOFRE(SO₂)

III.1.1 - INTRODUÇÃO

A natureza do gás dióxido de enxofre(SO_2) provém de apreciáveis concentrações dos gases vulcânicos. No entanto, hoje, ele é originado, principalmente pelas indústrias químicas, através da combustão do enxofre(S) contido nos minerais e combustíveis fósseis(petróleo, carvão).

O dióxido de enxofre(SO_2) é usado em indústrias para branqueamento, produção de ácido sulfúrico (H_2SO_4), sulfito para celulose, alvejante e agente preservante, fluido refrigerante líquido para os refrigeradores e como precipitador nas indústrias petrolíferas.

Este gás é, sem dúvida, o mais importante poluente atmosférico. O controle e a redução de sua emissão é um fator primordial na preservação do meio ambiente.

A maioria dos países desenvolvidos já possuem uma legislação e regulamentação visando um rigoroso controle.

No Brasil normas regulamentadoras(NR) aprovadas pela portaria 3214, MTB de 8/6/78(8), que decretam o limite de tolerância para ambientes de trabalho igual a 4ppm(partes de gás por milhão de ar) ou $10\text{mg}/\text{m}^3$ (miligramas de gás por metro cúbico de ar) para um período de 48 horas/semana.

A presente revisão tem por objetivo mostrar alguns aspectos básicos que são relevantes sobre este gás, bem como o desenvolvimento de um método analítico colorimétrico(iodometria) para análise específica do dióxido de enxofre(SO_2).

III.1.2 - ASPECTOS GERAIS

III.1.2.1- PROPRIEDADES FÍSICAS

A tabela 3 lista algumas das principais propriedades físicas do gás dióxido de enxofre(SO_2)(9):

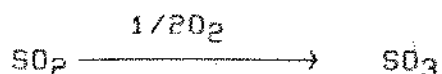
TABELA 3 - PROPRIEDADES FÍSICAS DO DIÓXIDO DE ENXOFRE

Peso Molecular (g/gmol)	64,06
Densidade(gás) (g/cm ³)	2,927*E-03 a 0°C e 1atm
Densidade específica (líq)	1,434 a -10°C
Volume Molar(líq) (cm ³)	44
Ponto de fusão (°C)	-75,46
Ponto de Ebulição (°C)	-10,02
Temperatura Crítica (°C)	157,2
Pressão Crítica (atm)	77,7
Calor de Fusão (cal/mol)	1,769*E+03
Calor de vaporização (cal/mol)	5,96*E+03
Constante Dielétrica	13,9 a 14,5°C
Viscosidade (dina*s/cm ²)	3,9*E-03 a 0°C

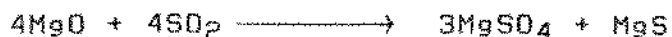
III.1.2.2- REAÇÕES QUÍMICAS

Perkins(9) destaca algumas reações que podem remover o dióxido de enxofre(SO_2) do ar atmosférico:

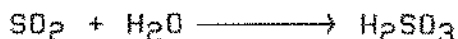
a) Na presença de óxidos metálicos:



b) Oxidação do SO_2 à sulfato, em presença de óxidos metálicos:



c) Reação entre o dióxido de enxofre(SO_2) e água para formar ácido sulfuroso(H_2SO_3):



d) Reação entre o trióxido de enxofre e o vapor de água formando ácido sulfúrico, na reação:



A falta de altas concentrações do dióxido de enxofre (SO_2) na atmosfera, por algum período, não significa que pouco ou nenhum tenha sido emitido. No entanto, o dióxido de enxofre(SO_2) pode ter sido convertido para sulfatos e ácido sulfúrico.

III.1.2.3- EFEITOS DO DIÓXIDO DE ENXOFRE(SO_2)

Leithe(11), Azevedo e Della Rosa(12) fazem uma revisão dos problemas que podem causar, os poluentes contendo enxofre(S), nos seres animados e inanimados, como previni-los e analisá-los quantitativamente.

O dióxido de enxofre(SO_2) é um gás fortemente irritante, o qual é facilmente detectado pelo seu sabor e odor. Pessoas sensíveis podem perceber 0,3 ppm(partes de gás por milhão de ar) pelo sabor e de 0,3-1 ppm pelo odor.

O efeito do dióxido de enxofre(SO_2) nas vias respiratórias é aumentada pela presença do vapor de água ou fumaça. Isso

ocorre, pois o gás é, na maioria das vezes, dissolvido nas membranas mucosas da boca e nariz. No entanto, quando está na forma de aerossóis, pode penetrar no órgão respiratório interno onde é convertido em ácido sulfúrico.

O ar respirado, poluído pelo dióxido de enxofre (SO_2), principalmente em nevoeiros espessos persistente, pode causar nas pessoas desde uma simples bronquite até a morte.

O efeito do SO_2 nas plantas é também muito importante. Concentrações entre 1-2 ppm (partes de gás por milhão de ar) podem, em poucas horas, levar a destruição dos tecidos das plantas.

Em plantas sensíveis o prejuízo pode acontecer numa concentração do gás menor ou igual a 0,3 ppm. Uma concentração de 0,15 ppm é dado como limite de tolerância, mesmo para as plantas mais sensíveis. Ramos, plantas leguminosas e centeio são particularmente suscetíveis a esses perigos.

A quantidade de SO_2 na atmosfera pode aumentar fortemente a corrosão dos metais, danificar revestimentos e construções.

III.1.3 - MÉTODOS DE ANÁLISE DO DIÓXIDO DE ENXOFRE

III.1.3.1 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

Pesquisadores, desde 1915, preocupados com a mudança da atmosfera, procuram divulgar trabalhos relacionados com uma metodologia de análise para quantidades variáveis do gás dióxido de enxofre(SO_2). Muitos métodos inorgânicos quantitativos são sensíveis, rápidos e confiáveis dentro das suas condições de trabalho.

Entre os principais temos:

- Colorimétrico
- Condutimétrico
- Coulométrico
- Espectrofotométrico
- Cromatográfico à gás

Doutros métodos foram desenvolvidos, sendo que cada um com suas restrições, mas com objetivo final de melhorar e aperfeiçoar a análise. Métodos como turbidimétrico(13), potenciométrico(14), polarográfico(10), radioatividade(10) são tão importantes quanto os mencionados anteriormente, no entanto, não há maior interesse em descrevê-los.

Os principais fatores na escolha dentre as técnicas acima, é sobretudo o tipo de meio a ser analisado(localização, tempo do dia, variação de concentração, concentração de particulados e umidade do ar), disponibilidade de recursos e requisitos operacionais.

Alguns dos métodos mencionados acima foram adaptados às operações automáticas, havendo limitações na análise do gás de, aproximadamente, 0,01 ppm (partes de gás por milhão de ar).

III.1.3.1.1- DETERMINAÇÃO COLORIMÉTRICA

Esta metodologia foi desenvolvida de três maneiras diferentes, sendo classificadas e conhecidas como:

- West e Gaeke
- Peróxido de Hidrogênio
- Iodometria

West e Gaeke

O método West e Gaeke, especificado pela ASTM(14), é considerado sensível, seletivo e reprodutível.

Com uma amostra de ar o qual reage com uma solução de tetraclomercurato de sódio ou potássio (TCM), obtém-se um complexo estável e não volátil, chamado diclorosulfitomercurato. Com a adição do ácido branqueador pararosanilina e formaldeído levam a formação do ácido metilsulfônico de pararosanilina vermelho-púrpura. Deste ácido determina-se a quantidade de dióxido de enxofre (SO_2) formado, por um espectrofotômetro ou um colorímetro. O pH da solução final é ajustado para $1,6 \pm 0,1$ pela adição do ácido fosfórico (H_3PO_4).

A intensidade da cor é medida em 548m μ (milimicrons) e a variação da concentração atingida é de 0,003-5,0ppm.

A reação é específica para o dióxido de enxofre(SO_2) e sais sulfitos.

Interferências como dióxido de nitrogênio(NO_2) e ozônio(O_3) podem ser eliminados pela adição do ác. sulfâmico na solução absorvente antes da análise. Metais pesados(Fe , Mn , Cr) são eliminados com adição do sal disódio do ác. etilenodiaminotetracético (EDTA) e ác. fosfórico(H_3PO_4).

Perry e Tabor (15) descrevem um trabalho desenvolvido pela National Air Sampling Network(NASN)-E.U.A., que baseado no método analítico de West e Gaeke constroem um autoanalisador modular. O equipamento, por sua vez, é também utilizado para a análise do dióxido de nitrogênio(NO_2). O tempo de análise é de 24 horas.

Peróxido de Hidrogênio

O método peróxido de hidrogênio é menos específico do que o método West e Gaeke, no entanto, é mais simples e requer pouco equipamento. O método é aplicável para uma variação de concentração do dióxido de enxofre(SO_2) no ar de 0,01-10ppm. A amostra de ar é lavada com uma solução de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) num pH igual 4,5-5,0. O dióxido de enxofre é determinado a partir da titulação entre o ácido sulfúrico (H_2SO_4) formado e a solução padrão de hidróxido de sódio(NaOH). (16,17)

O dióxido de carbono(CO_2) não interfere, mas gases com alta acidez (como ácido clorídrico (HCl)), gases alcalinos (como amônia (NH_3)) e sólidos (como limo e poeira), podem interferir eventualmente na análise.

Cumming e Redfearn(18) descrevem um equipamento automático com registro contínuo, das concentrações do dióxido de enxofre(SO_2), numa variação 0-50 pphm (partes do gás por 100 milhões de partes de ar em volume) e com uma sensibilidade de 1 pphm. A metodologia de reação está descrita na referência 19.

Iodometria

O método consiste na determinação do gás dióxido de enxofre(SO_2) no ar atmosférico.

A amostra de ar é absorvida numa solução de Iodo/Iodeto de Potássio, tendo o amido como indicador. Após a retenção de uma amostra do ar titula-se com uma solução padrão de tiosulfato de sódio.

O primeiro método iodométrico para a determinação rápida de pequenas quantidades do dióxido de enxofre(SO_2) no ar foi usado por Marston e Wells, em 1915, numa investigação feita pela Comissão de Fundidores Selby. O método foi desenvolvido para estimar o dióxido de enxofre(SO_2) na atmosfera do ar numa concentração de 0,05-20ppm em volume.

Dando sequência ao trabalho, MacKay e Ackerman(19) construíram um aparelho para análise do dióxido de enxofre(SO_2), modificando este método tanto em volume de amostra como da solução. O aparelho é aplicável para concentrações de 0,01 a 10% em volume.

Thomas e Cross(20), seguindo o mesmo raciocínio de Marston e Wells, construíram um aparelho automático para determinar a concentração do dióxido de enxofre(SO_2) numa faixa de 0,1 a 60ppm. Os dados encontrados indicaram a estabilidade da solução,

bem como a eficiência de absorção do gás.

Em seguida, Ellis(21) comprovou a relação de estabilidade da solução iodo/iodeto e mostrou que a solução dissipava mesmo no escuro, pela insuficiência de iodeto. A padronização da solução foi feita com tiossulfato de sódio, pois esta solução possuía um tempo de vida útil maior que a solução de arsenito de sódio(titulante).

O método descrito por Smith e Friis(21) consiste na absorção do dióxido de enxofre(SO_2) em hidróxido de sódio(NaOH), o qual neutralizou com ácido clorídrico(HCl), e titulou com uma mistura da solução iodo/amido.

Katz (21) desenvolveu um analisador automático contínuo para o dióxido de enxofre(SO_2), o qual acoplou uma cela fotoelétrica e um registrador potenciométrico, para indicar o aumento da transmitância da solução iodo/amido após a aspiração do ar contaminado. O método é específico para o SO_2 em áreas siderúrgicas. O instrumento detecta numa variação de 0,01-1ppm, ou mais dependendo do volume e concentração da solução e da amostra de ar que passa através da solução.

No entanto, para todos estes métodos ocorrem as interferências do dióxido de nitrogênio(NO_2) e ozônio(O_3).

III.1.3.1.2- DETERMINAÇÃO ELETROCONDUTIMÉTRICA

A eletrocondutividade é dependente, sobretudo, do número e tipo de íons dissolvidos em solução. Basicamente, a reação processa-se em presença do dióxido de enxofre(SO_2) absorvida em água deionizada.(22)

Gases solúveis, que aumentam a eletrólise da solução, causam uma grande interferência nesse método. Todos os haletos de hidrogênio presentes seriam medidos. Gases fracamente ácidos, (como o ácido sulfídrico(H_2S)), praticamente, não causam interferência, por causa da sua pouca solubilidade e baixíssima condutividade.

Se a água(H_2O) for de pH ácido, o dióxido de carbono(CO_2) contido no ar, não causa interferência. Gases alcalinos (como a amônia(NH_3)), interfere na neutralização do ácido e aumenta comparativamente o resultado, por causa do número de íons hidrogênio. Similarmente, limo, poeira ou outros sólidos básicos, se absorvidos, causam baixos resultados do gás.

Este método atinge uma variação de concentração acima de 0,05ppm.

Outra maneira de determinar o dióxido de enxofre(SO_2)(23) é pela absorção do gás numa solução de peróxido de hidrogênio, onde ocorre a formação do ácido sulfúrico(H_2SO_4). Esse método é o mais utilizado pela sua simplicidade e flexibilidade de medidas. Sua variação de concentração está acima de 0,05ppm.

Praticamente, todas as interferências mencionadas acima são comuns a este método.

III.1.3.1.3- DETERMINAÇÃO COULOMÉTRICA

A ação redutora do dióxido de enxofre(SO_2) em soluções de haletos de potássio(I ou Br), isentos de halogêneos, são usados por um analisador coulométrico de SO_2 .(24,25)

As interferências mais comuns do método são: ácido sulfídrico(H_2S), ozônio(O_3), cloro(Cl_2), sendo as principais dióxido de nitrogênio(NO_2) (5%) e mercaptanas (etílico e metílico) (100%).

O tempo de análise varia de 3 a 5 minutos e a variação da concentração atinge de 0-0,2 ppm.

O método não é seletivo e não é recomendado para medidas de precisão do dióxido de enxofre(SO_2) no ar.

Os instrumentos comerciais diferem apenas do modo operacional e da faixa de sensibilidade, como por exemplo:

- a) Philips PW 9700 - detecta abaixo de 4 ppb (partes de gás por bilhão de ar);
- b) Beckmann ou T.E.M. Ltd. - detecta na faixa 0-200 ppm do dióxido de enxofre(SO_2).

III.1.3.1.4- DETERMINAÇÃO ESPECTROFOTOMÉTRICA

A redução do Fe(III) à Fe(II) pelo dióxido de enxofre(SO_2) é, muitas vezes, usado na determinação de Ferro. Stephens e Lindstrom(26) empregaram essa reação para a determinação do dióxido de enxofre(SO_2) na presença de 1,10 fenantrolina, o qual com o Fe(II) produz uma cor brilhante amarelada.

A solução de absorção é preparada com a solução de sulfato de amônio férrico, solução 1,10 fenantrolina e hidróxido de sódio(NaOH) para a correção do pH = 5-6.

As medidas foram feitas num espectrofotômetro UV visível em 510m μ (milimicrom).

O ozônio, formaldeído e o ácido sulfídrico(H_2S) interferem em presença de pequenas quantidades.

Styly(27) descreve um método de determinação do dióxido de enxofre(SO_2), por espectrofotometria, considerando-o rápido e específico. Este método requer um mínimo de tratamento da amostra e é absolutamente livre de interferências. O dióxido de enxofre (SO_2), retido numa solução absorvente (como a água), é tratado com uma solução ácida (como o ácido sulfúrico(H_2SO_4)). Então, é transportado por uma corrente de gás de arraste até uma cela de absorção. A corrente gasosa é medida num espectrofotômetro de absorção ultravioleta em 215nu(nanomicron).

O limite de sensibilidade é 4ug(micrograma) do dióxido de enxofre(SO_2), desde que injetado 2ml de 204ug(micrograma) de SO_2 por ml.

O dióxido de nitrogênio(NO_2), dióxido de carbono(CO_2) e o ácido sulfídrico(H_2S) não causam interferências.

III.1.3.5- DETERMINAÇÃO CROMATOGRÁFICA À GÁS

O procedimento recomendado para a determinação do dióxido de enxofre(SO_2) na atmosfera é a separação cromatográfica do gás seguido por um detector fotométrico de chama(DFC). (24,28)

Uma amostra é aspirada, dentro de um circuito fechado, por uma válvula de amostragem de gás. A válvula é, então, ligada para injetar a amostra na coluna de cromatografia, onde o SO_2 é separado de outros compostos gasosos de S. O gás passa dentro do DFC e é registrado.

A resposta do detector é menor que 1ppm.

Não há conhecimento de interferências com esse método para a análise do SO_2 no ar. A resposta pode ser afetada por altas concentrações de hidrocarbonetos em meios especiais.

Atualmente os métodos analíticos estão sendo substituídos por equipamentos comerciais específicos para a análise do gás dióxido de enxofre. São simples de manusear, confiáveis e rápidos na resposta. A confiabilidade, dada pelos fabricantes, é de 95%. O limite inferior de detecção do gás está em torno de 0,5 ppb (partes de gás por bilhão de ar).

Pode-se citar como exemplo: Sulfur Dioxide Analyzer-Model SA285A, fabricado pela Columbia Scientific Industries Corporation(29) e Pulsed Fluorescence SO_2 Analyser -Model 43A, fabricado pela Thermo Electron Instruments(30).

III.1.4- MÉTODO COLORIMÉTRICO(IODOMETRIA) PARA ANÁLISE DO GÁS DIÓXIDO DE ENXOFRE(SO₂)

III.1.4.1- REAGENTES UTILIZADOS:

- Iodeto de Potássio P.A. - Fabricante: INCASA-Indústria e Comércio Catarinense S.A.; grau de pureza: 99%.
- Iodo Ressublimado P.A. - Fabricante: ECIBRA-Reagentes Analíticos; grau de pureza: 99,8%.
- Amido solúvel P.A. para iodometria -Fabricante: ECIBRA-Reagentes Analíticos.
- Tiosulfato de Sódio (5 hidrato) - Fabricante: MERCK S.A.-Indústrias Químicas; grau de pureza: 99,5%

III.1.4.2- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DA SOLUÇÃO DE AMOSTRAGEM

- Pesa-se exatamente 0,5g de iodo metálico;
- Pesa-se exatamente 2,0g de iodeto de potássio;
- Dissolve-se o iodo e o iodeto numa pequena quantidade de água. Deixa-se agitando até a dissolução total do iodo. Em seguida, dilue-se a um volume de 500ml;
- Para a utilização desta solução, deve-se diluí-la 1/50, obtendo-se uma normalidade de $1,123 \pm 0,005 \times 10^{-4}$ N;
- Esta solução deve ficar em repouso por 24 horas. É importante mantê-la em lugar fresco e pouca iluminação;
- Pesa-se 1g de amido para 40ml de água. Recomenda-se fazer o indicador no dia das amostragens;

III.1.4.3- DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

A montagem do analisador, figura 3, consta dos seguintes acessórios:

- Cilindro de mistura sintética (mistura especial industrial) fornecida pela Oxigênio do Brasil S.A.. Para maior precisão na coleta dos dados utilizou-se dois cilindros de mistura padrão de diferentes composições, sendo as seguintes:

$1,3 \pm 0,04 \%$ SO_2		$0,51 \pm 0,02 \%$ SO_2
$10,0 \pm 0,3 \%$ CO_2	e	$9,99 \pm 0,3 \%$ CO_2
$5,0 \pm 0,15 \%$ O_2		$5,02 \pm 0,15 \%$ O_2
Q.S. $\%$ N_2		Q.S. $\%$ N_2

- Compressor de ar: da Metalúrgica Schulz S.A. com deslocamento máximo de ar de $2,85 \times 10^3 \text{ cm}^3/\text{s}$, potência de 1HP e pressão máxima de $6,8 \times 10^3 \text{ g/cm}^2$.

- Válvulas de controle, do tipo agulha, de aço inoxidável. Fabricante: Detroid

- Fluxímetros capilares: a construção dos fluxímetros foram fornecidos pela empresa Termoquip S.A.. O capilares eram de aço inoxidável, dos seguintes diâmetros e comprimentos:

CAPILAR	DIÂMETRO (cm)	COMPRIMENTO
1	0,05	13
2	0,05	13
3	0,10	30

Os fluxímetros capilares foram calibrados com o auxílio de um fluxímetro de bolhas, para a obtenção das vazões correspondentes

- Pincas de Mor: tem a função de interromper e desviar o fluxo de gás.

- Bomba de vácuo: da Industria Mecânica PRIMAR LTDA, modelo 141, tipo 2 cv e deslocamento máximo de ar de $617 \text{ cm}^3/\text{s}$.

- Válvula reguladora de pressão: da Oxigênio do Brasil S.A., aço inoxidável, modelo IH-15, pressão máxima de $2,0 \times 10^5 \text{ g/cm}^2$.

- Válvula reguladora de pressão: da Indústria NORGRE-EN com pressão máxima de $1,17 \times 10^4 \text{ g/cm}^2$.

- Frasco borbulhador com placa sinterizada.

- Frasco kitassato e agitador magnético, para auxiliar a mistura gasosa.

- Fluido manométrico: nujol, com densidade igual a $0,857 \text{ g/cm}^3$ (valor experimental); fabricado pela indústria química e farmacêutica Schering S.A.-RJ.

III.1.4.4- PROCEDIMENTO OPERACIONAL

- Com a estimativa da composição do gás e a vazão da mistura padrão, pode-se determinar o valor correspondente da vazão de ar pela seguinte equação:

$$\% \text{SD}_2 = \frac{(y^*) * Q_m}{Q_a + Q_m} * 100\% \quad (1)$$

onde:

y^* = fração volumétrica do gás presente na mistura padrão

Q_m = vazão volumétrica da mistura padrão (cm^3/s)

Q_a = vazão volumétrica do ar (cm^3/s)

Com as vazões estabelecidas, encontra-se o valor da deflexão, correspondente, nas curvas de calibração dos fluxímetros.

- Liga-se, o compressor de ar e abre-se o cilindro de mistura. Até a estabilidade dos fluxímetros, purga-se toda a diluição.

- Após a estabilidade dos fluxímetros, parte da solução diluída segue para amostragem, numa vazão aproximada de $1 \text{ cm}^3/\text{s}$, e o restante é purgado.

- Mede-se, então, o valor correto das deflexões e, conseqüentemente, as vazões. Com isso, pode-se saber o valor real da composição do gás.

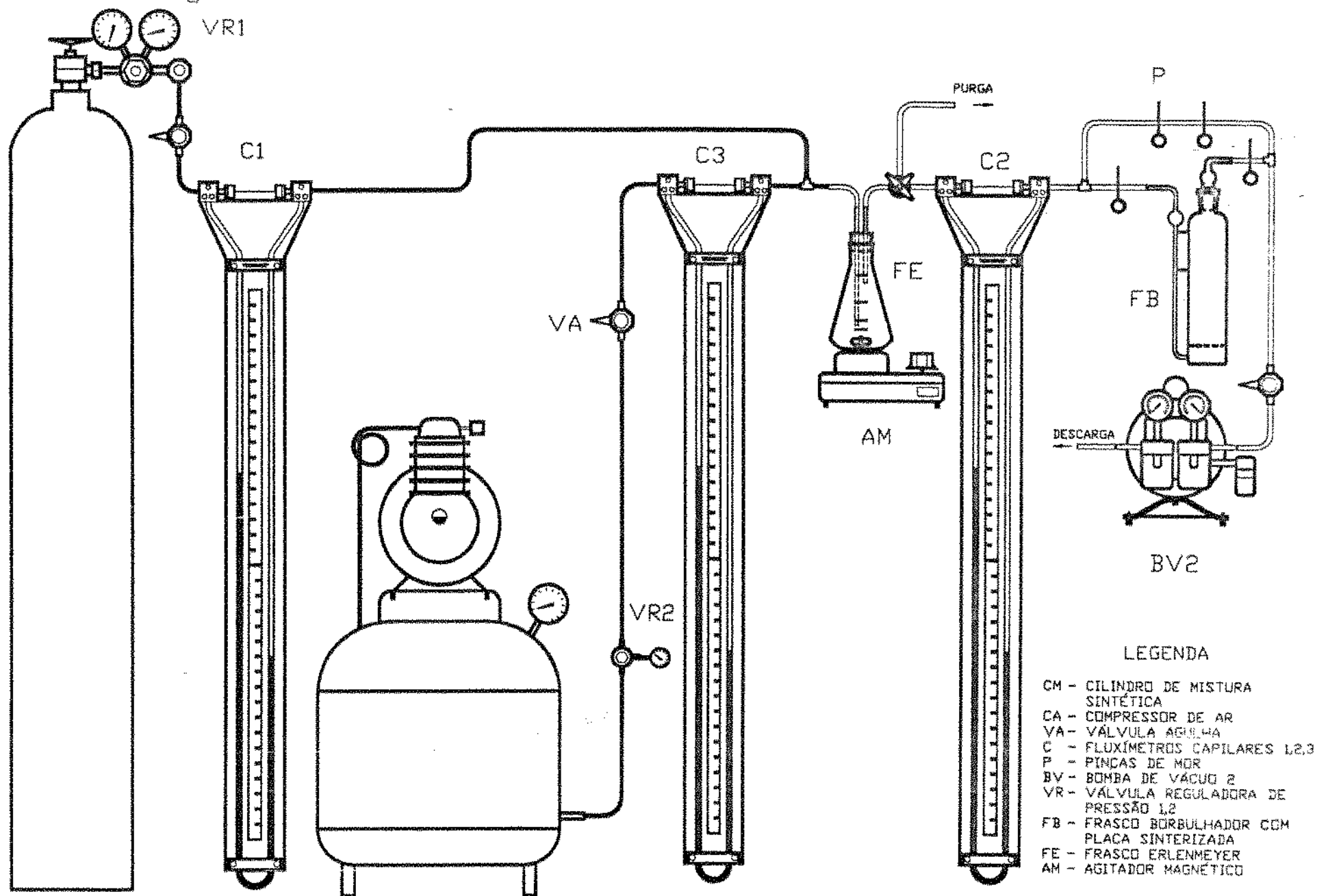
- Com a solução de iodo/iodeto, preparada anteriormente, mede-se o tempo de descoloramento da solução.

- Para que não haja problema de contaminação na linha de amostragem, é importante que o fluxo do gás diluído, seja contínuo.

III.1.4.5- MONTAGEM EXPERIMENTAL DO ANALISADOR

A figura 3 descreve a montagem experimental realizada para análise do gás dióxido de enxofre em várias concentrações.

Figura 3 - ANALISADOR PARA O GÁS DIÓXIDO DE ENXOFRE



III.2 - ASPECTOS EXPERIMENTAIS DA ADSORÇÃO

III.2.1-INTRODUÇÃO

A fluidização de sólidos é um modo de contato, no qual as partículas são mantidas em suspensão pelo efeito do arraste do fluido, em contraposição ao peso aparente do conjunto das mesmas partículas.

A divisão e subdivisão do estudo da fluidização pode ser feita em 3 categorias principais:

a) mecanismos de fluidização de partículas sólidas por um líquido ou um gás, que são tratados principalmente nas referências 31, 32, 33, 34 e 35;

b) transferência de calor e massa entre fluidos e partículas sólidas, como citadas nas referências 6, 36, 37, 38, 39.

c) reações químicas(40, 41, 42)- divide-se em dois tipos básicos:

c.1) onde um ou mais produtos de reação permanecem no estado sólido, tal como a redução de metais refratários e dessulfurização de gases com óxidos de ferro.

c.2) onde os principais produtos de reação estão na fase gasosa, tal como na redução de metais no qual são volatéis na temperatura de reação, gaseificação dos combustíveis sólidos e a cloração de minerais.

A presente revisão consiste na apresentação de alguns dados elementares sobre o mecanismo da fluidização convencional, bem como o estudo da transferência de massa no processo de adsorção.

A predição do comportamento de um leito fluidizado requer o conhecimento de alguns parâmetros básicos como a taxa de

escoamento do gás através de um leito poroso, queda de pressão e porosidade.

As medidas experimentais foram utilizadas diretamente sem a preocupação de predizê-las através de correlações empíricas e teóricas.

Os resultados obtidos do comportamento dinâmico dos leitos, serão utilizados para o processo de adsorção do gás em análise (SO_2).

III.2.2 - MONTAGEM EXPERIMENTAL

A figura 4 mostra o fluxograma simplificado da unidade de adsorção. Esse sistema foi construído em vidro pirex de modo a evitar a corrosão e possibilitar a visualização do leito fluidizado.

A construção deste equipamento foi realizada pela Empresa Glissa S.A., localizada na região de Campinas-SP.

A montagem consiste, basicamente, de uma câmara de retenção de gás (pulmão), um vaso de fluidização e válvulas de 2 e 3 vias, para efetuar as operações de mistura, recirculação e amostragem dos gases.

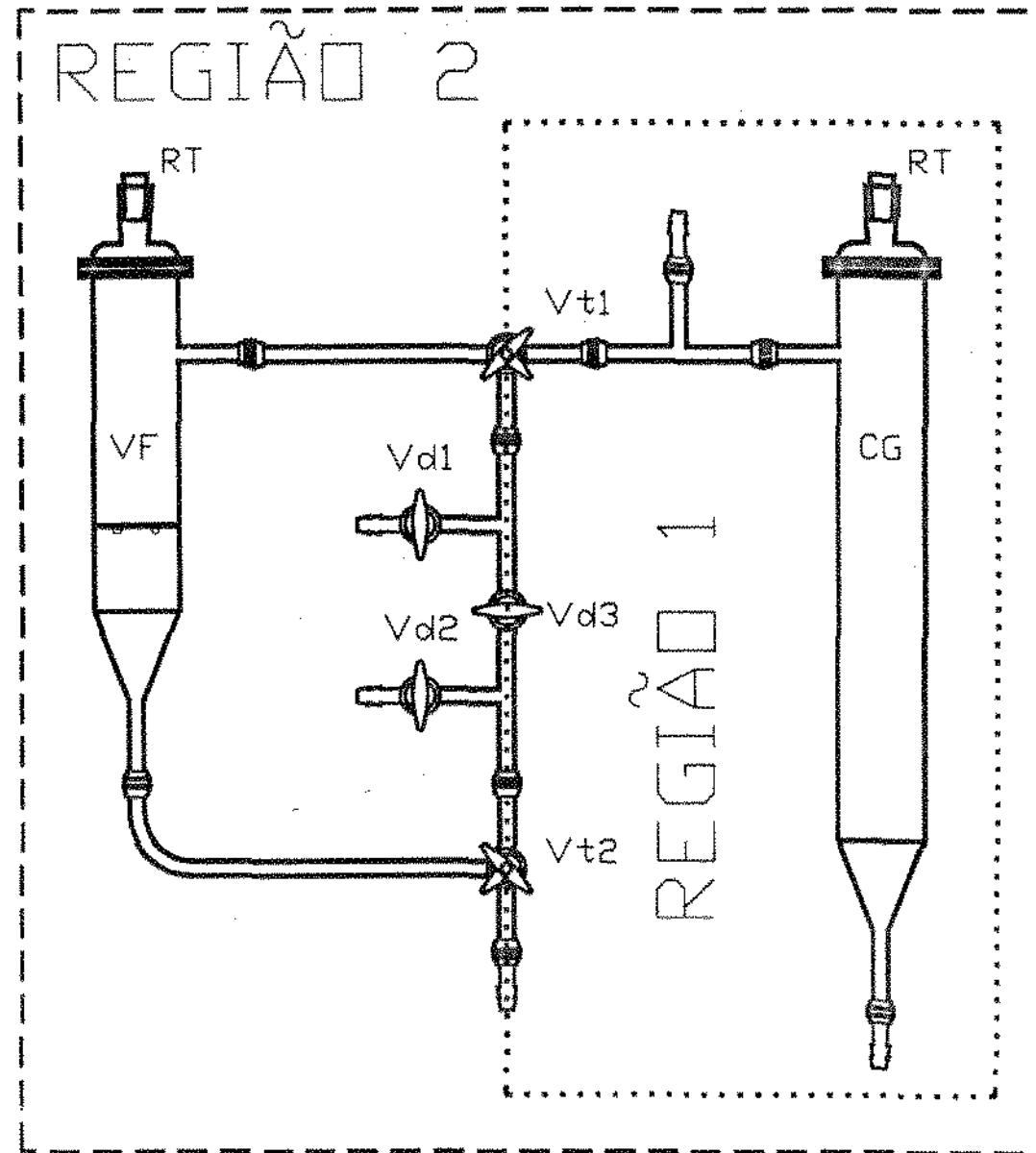
O sistema experimental constitui de 2 seções principais:

a) Mistura do gás: onde ocorre a circulação da mistura gasosa (região 1);

b) Fluidização: onde faz-se o contato gás-sólido (região 2).

O dimensionamento desta unidade é mostrada na figura 5.

Figura 4 - FLUXOGRAMA DA UNIDADE DE ADSORÇÃO



LEGENDA

- CG - CÂMARA DE RETENÇÃO DE GÁS
- VF - VASO DE FLUIDIZAÇÃO
- Vd - VÁLVULAS DE 2 VIAS 1,2,3
- Vt - VÁLVULAS DE 3 VIAS 1,2,3
- RT - ROLHAS REVESTIDAS DE TEFLON

[illegible]

III.2.3-PREPARAÇÃO DO LEITO FLUIDIZADO

III.2.3.1- ESCOLHA DO TIPO DE DISTRIBUIDOR

A qualidade de uma fluidização é influenciada pelo tipo de distribuidor usado. (43)

Para um projeto de uma placa ou um distribuidor, primeiramente, deve-se determinar o tipo de espalhamento do leito bem como a faixa de pressão desejada.

Os autores Kunii-Levenspiel e Perry-Chilton (43, 35) mostram detalhadamente alguns tipos de placas ou distribuidores que são mais utilizados. A figura 6 mostra alguns destes tipos.

Os materiais encontrados, comercialmente, são metálicos, cerâmicos e de vidro.

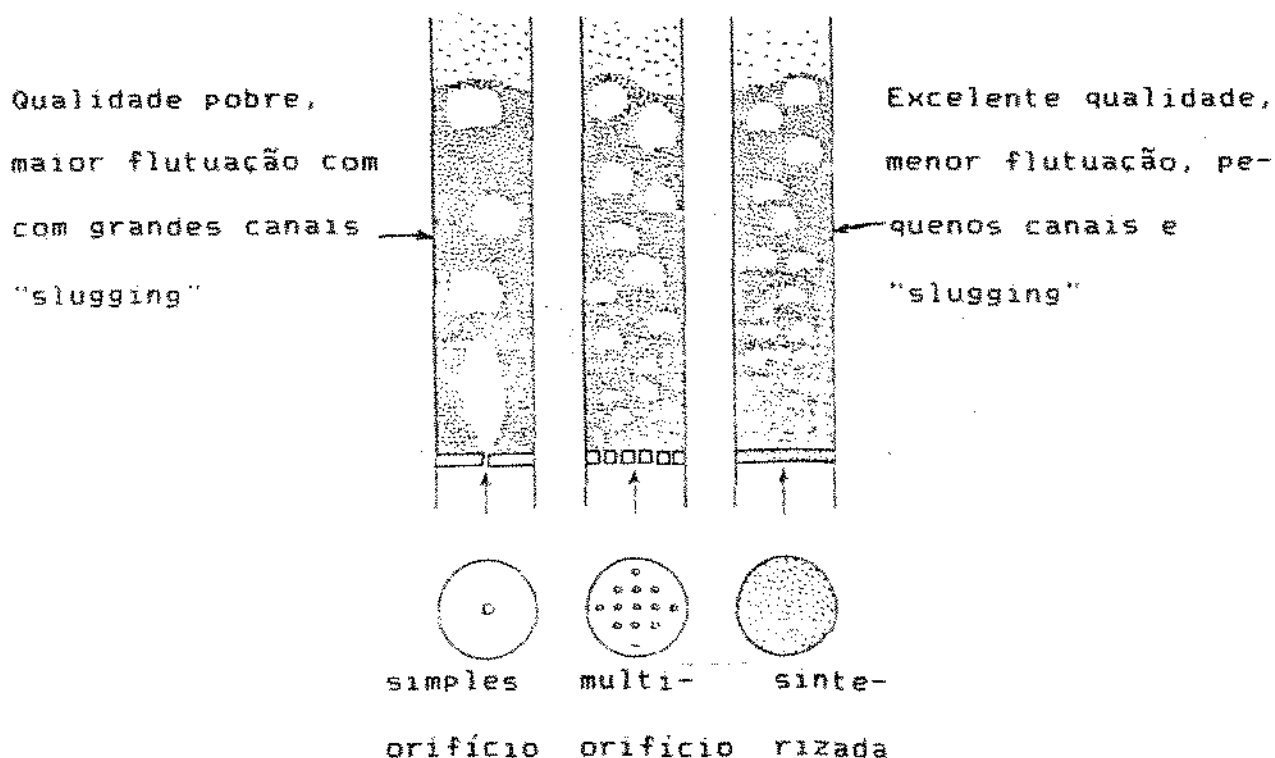


FIGURA 6 - Qualidade da fluidização influenciada pelo tipo de distribuidor

III.2.3.2- MONTAGEM E ESPECIFICAÇÃO DA PLACA POROSA

O leito fluidizado foi suspenso por uma placa porosa composta de esferas de vidro de 0,1cm em diâmetro e 10% de araldite de endurecimento lento (figura 7). O dimensionamento da placa consiste num diâmetro de 6,5 cm e uma altura de 0,67 cm.

A montagem da placa foi feita manualmente, da seguinte maneira:

- Pesa-se 32g de esferas de vidro de 0,1cm;
- Pesa-se 3,2g de araldite (esta pesagem deve ser dividida pelo dois frascos que compõe o araldite);
- Mistura-se bem, até a uniformidade dos dois materiais. Isso pode ser auxiliado por uma espátula de vidro;
- Com o auxílio de um anel modulador de vidro, faz-se a compactação da placa sobre uma superfície plana de fórmica, para que não haja problemas de aderência total dos materiais. Deixa-se secar por 36 horas;
- Corta-se um anel de borracha tipo latex endurecido num diâmetro externo de 6,5 cm e interno de 5,3 cm. O anel é, então, revestido com fita de teflon, para não haver contaminação do gás pela borracha.
- Fixa-se a placa porosa no anel com algumas gotas do adesivo instantâneo superbonder, da Loctite Brasil, e deixa-se secar;
- Ao final usa-se borracha de silicone para o acabamento da placa.

Após a montagem final introduz-se, manualmente, no vaso de fluidização.

A figura 7 mostra a montagem final da placa porosa e sua especificação.

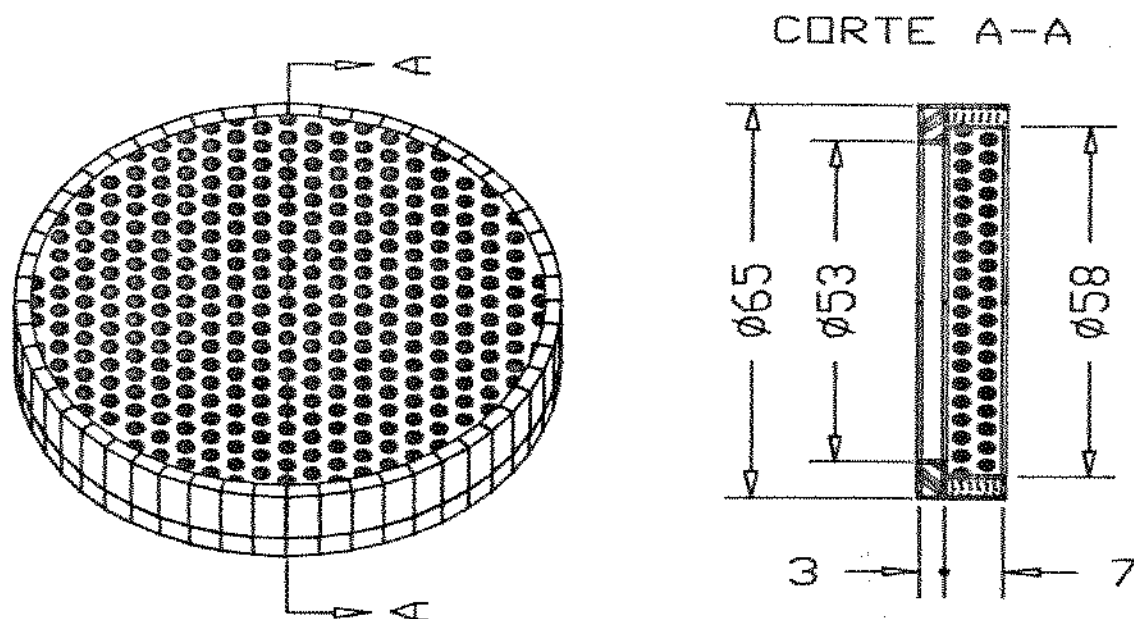


Figura 7 - PLACA POROSA

III.2.3.3-INSTALAÇÃO DO LEITO FLUIDIZADO

Com a utilização do anel de borracha, para a sustentação do leito, percebe-se que a região próxima a parede do vaso não fluidiza. Para ter certeza da área fluidizada, opta-se em colocar um tubo de vidro com mesmo diâmetro interno do anel.

A anexação do tubo com a placa faz-se com borracha de silicone, apenas na região anelar.

III.2.3.4- SELECÇÃO DO MATERIAL APROPRIADO

O material adsorvente adequado para o processo de adsorção do dióxido de enxofre é o fator principal para a obtenção de bons resultados.

Algumas experiências tem mostrado que para a adsorção em adsorventes orgânicos(44), o carvão ativado tem propriedades seletivas e uma alta capacidade de adsorção.

Adsorventes inorgânicos, tais como, sílica gel, alumina ativa, podem ser usados para adsorver materiais orgânicos, mas alguns problemas podem surgir durante o processo de regeneração do adsorvente.

O processo normal de regeneração do adsorvente é utilizando vapor, ar quente, nitrogênio ou outra corrente gasosa, mas isso pode causar uma ligeira decomposição do composto orgânico no adsorvente. Como resultado, dois problemas podem surgir:

- a) Recuperação incompleta do fluido em questão(adsorbato)
- b) O adsorvente, progressivamente, deteriora em função do número de ciclos. Isto é devido ao fechamento dos poros do carvão, formado pela decomposição do hidrocarboneto.

CARVÃO ATIVADO

O carvão ativado tem alta capacidade para a adsorção, devido a sua grande área superficial disponível para adsorção ($5 \times 10^6 - 1,5 \times 10^7$ cm²/g) resultando de um grande número de poros internos.

A adsorção em carvão ativado ocorre quando uma molécula entra em contato com a superfície sólida e mantida pelas forças físicas e/ou químicas. Como este processo é reversível, logo permite que o carvão seja regenerado por aplicações de calor e/ou

vapor.

Algumas propriedades aproximadas do carvão ativado, citadas na referência(44), estão listados abaixo:

Densidade Volumétrica: 609 - 664 g/cm³

Capacidade Calorífica: 0.27 - 0.36 cal/g °C

Volume de poros: 0.56 - 1.2 cm³/g

Diâmetro médio de poros: 10 - 100 Å

Temperatura de regeneração: 100 - 400°C

Temperatura permissível: 150°C

O carvão utilizado neste trabalho tem procedência da Indústria PANAC-RS, com as seguintes características:

perdas na secagem à 120°C - 8%

Cloretos - 0,01%

Fe - 0,005%

Sulfato - 0,01%

Zn - 0,0001%

Metais pesados (Pb) máx. - 0,0005%

III.2.3.5 - PREPARAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO

Em vista da necessidade de escolher o máximo de tamanhos de partículas adequados ao sistema, opta-se em adquirir um carvão ativado na forma granular.

Com o auxílio de almofariz e um pistilo tritura-se, manualmente, o carvão e em seguida peneira-se, com ajuda de Peneiras Granutest e uma máquina vibratória apropriada.

Após a separação por tamanhos de partículas testa-se na montagem, figura 8, quais os mais adequados.

III.2.4 - ASPECTOS EXPERIMENTAIS DA DINÂMICA DA FLUIDIZAÇÃO

III.2.4.1 - DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO:

A figura 8 mostra o equipamento experimental utilizado para a obtenção de dados de fluidização citados neste trabalho.

Os materiais utilizados para a construção da montagem são:

- Fluxímetros capilares (1 e 2): feitos em vidro pirex com diâmetros internos correspondente a 0,12cm e 0,19cm. A montagem destes foi feita na vidradria do Instituto de Química da UNICAMP;

- Manômetro em "U" de vidro pirex;

- Fluido manométrico: nujol, com densidade igual a $0,857\text{g/cm}^3$ (valor experimental): Fabricado pela Indústria Química e Farmacêutica SCHERING S.A.-RJ;

- Bomba de vácuo: Indústria Mecânica Primar Ltda, modelo 141, tipo 2vc e deslocamento máximo de ar: $620\text{ cm}^3/\text{s}$;

- Válvulas de controle, do tipo agulhas, de aço inoxidável: Fabricante: Detroid;

- Mangueiras de silicone de diâmetro interno de 0,65cm;

- Flanges de madeiras;

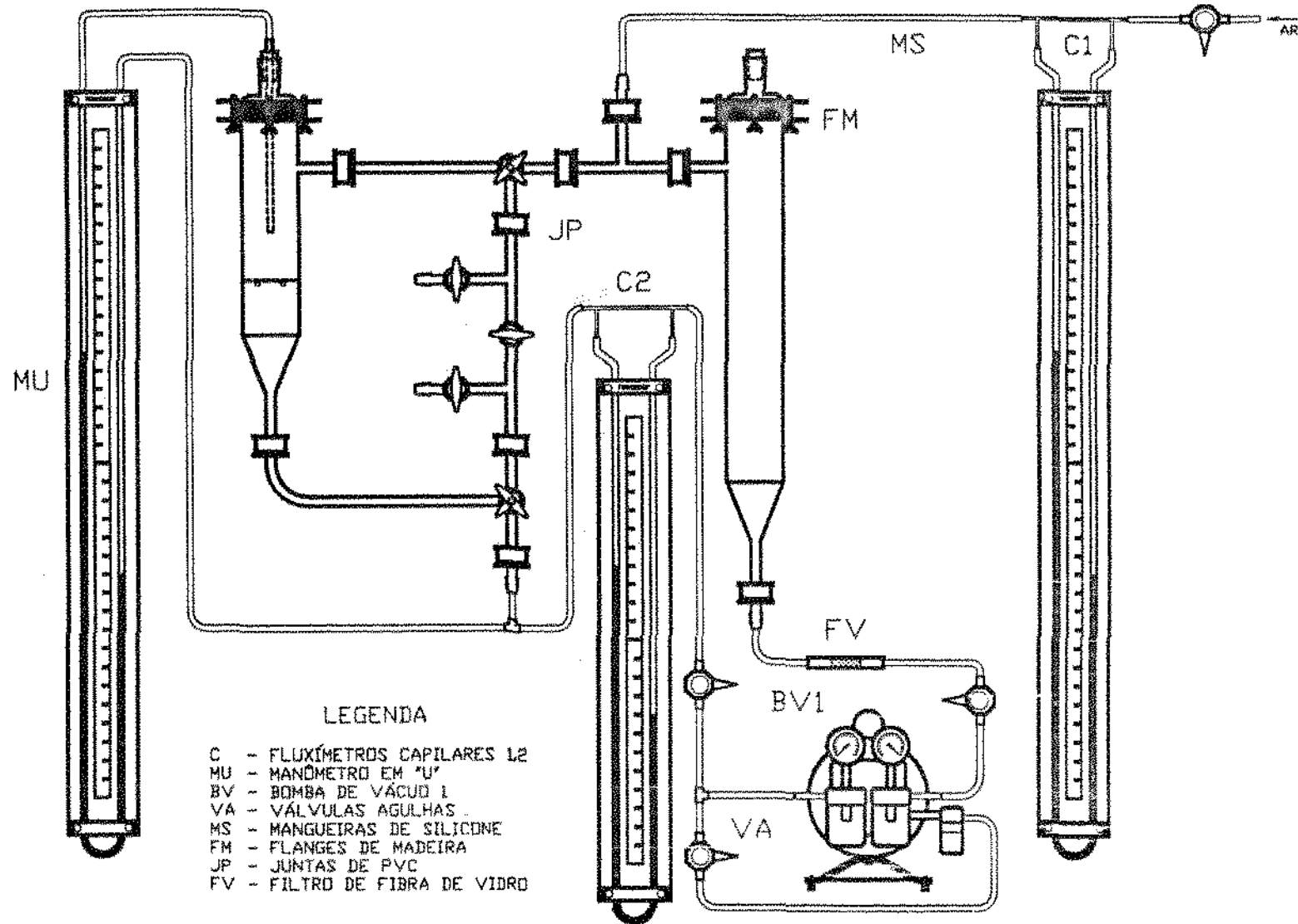
- Flanges de PVC com anéis vedantes de teflon;

III.2.2.2.2- PROCEDIMENTO OPERACIONAL

O circuito de amostragem faz-se da seguinte maneira:

- Ajusta-se as válvulas no sentido da região 1;
- Mede-se a vazão de ar na entrada e o tempo correspondente. O ar é succionado pela mesma bomba de vácuo que recircula o ar para o sistema;
- Fecha-se a válvula de entrada;
- Mede-se a vazão de ar recirculante e o tempo correspondente;
- Desliga-se a bomba de vácuo1;
- Gira-se as válvulas lentamente no sentido da região2;
- Verifica-se a vazão de ar e mede-se a queda de pressão na entrada e saída do leito;

Figura 8 - MONTAGEM DA DINÂMICA DE FLUIDIZAÇÃO



III.2.5 - ASPECTOS EXPERIMENTAIS DA ADSORÇÃO DO DIÓXIDO DE ENXOFRE(SO₂)

III.2.5.1 - DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

As figuras 3 e 8 mostram as duas montagens fundamentais, que caracterizam a unidade de adsorção do dióxido de enxofre(SO₂).

O que deve-se observar neste item é a presença de um cilindro de mistura padrão, simulando o gás de combustão; as válvulas de controle tipo agulha para o ajuste na passagem do gás ao analisador e o ajuste da bomba de vácuo²; manômetro de mercúrio, para as medidas de pressões de vácuo e do gás residente no sistema, um frasco erlemeyer com solução de iodo como ponto referencial do gás, termômetro para medição da temperatura do carvão.

A figura 9 descreve a montagem da unidade de adsorção do gás dióxido de enxofre(SO₂).

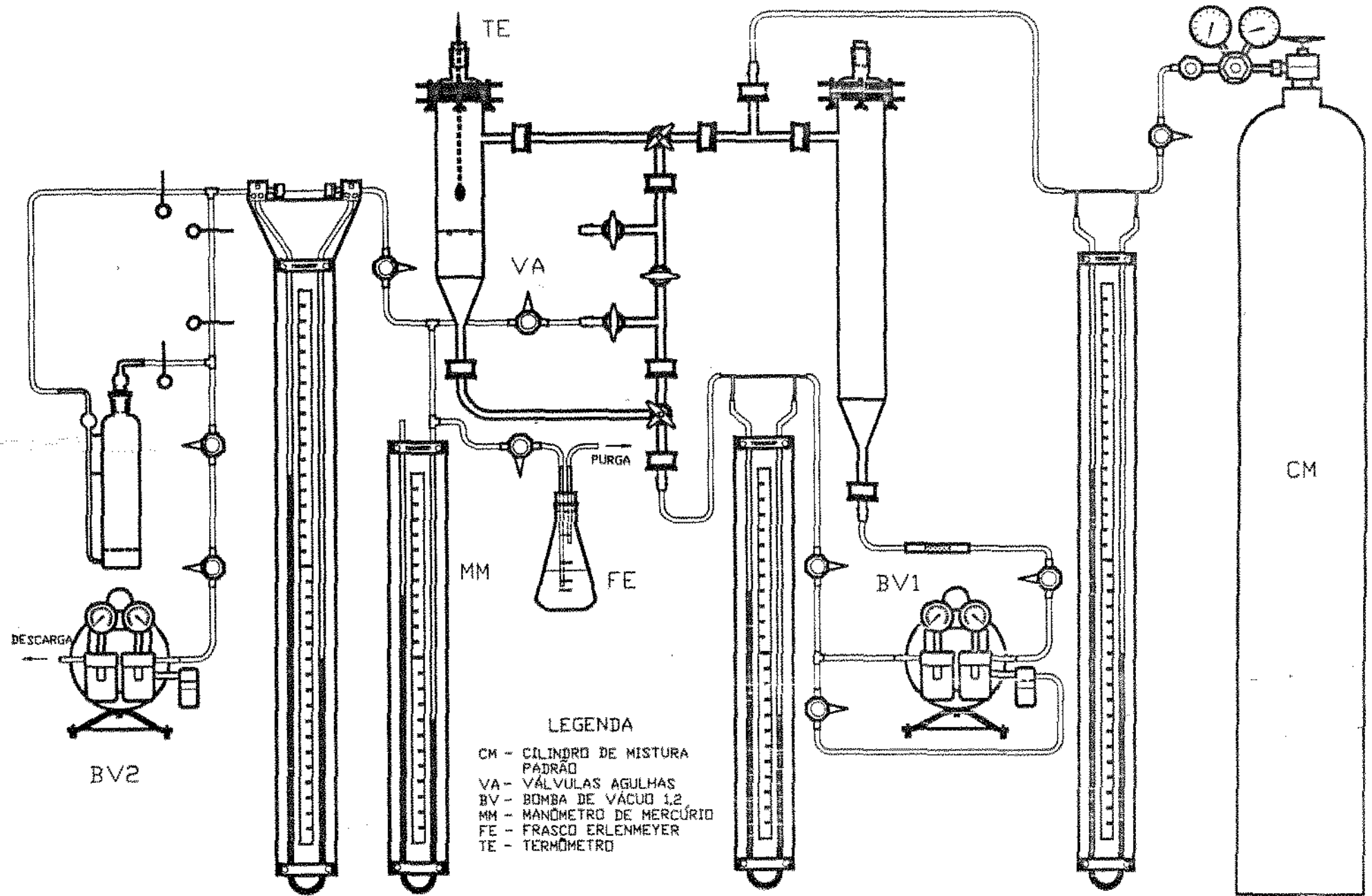
III.2.5.2-PROCEDIMENTO OPERACIONAL

Obedecendo a sequência do item III.2.4.2, pode-se caracterizar o método de operação, seguindo as etapas abaixo:

- Evacua-se todo o sistema com a bomba de vácuo²;
- Para a entrada do gás, as válvulas devem ser posicionadas no sentido da região¹;

- Liga-se a bomba de vácuo1 e deixa-se recircular o gás por um tempo pré-determinado;
- Desliga-se a bomba de vácuo1;
- Posiciona-se as válvulas para a análise do gás;
- Mede-se a concentração do gás em função do tempo de descoloramento da solução;
- Após a análise, interrompe-se o sistema de adsorção;
- Posiciona-se as válvulas no sentido da região2;
- Liga-se, novamente, a bomba de vácuo1 e mede-se o tempo de percurso de gás através o leito de carvão;
- Para as análises subsequentes do dióxido de enxofre(SO₂), procede-se da mesma forma

Figura 9 - UNIDADE DE ADSORÇÃO DE DIÓXIDO DE ENXOFRE



CAPÍTULO IV - CÁLCULOS DOS PARÂMETROS ENVOLVIDOS E
RESULTADOS EXPERIMENTAIS

IV.1 - MÉTODO COLDRIMÉTRICO (IODOMETRIA)

IV.1.1 - DADOS EXPERIMENTAIS

Os dados obtidos no experimento do método analítico estão apresentados na tabela 4.

TABELA 4 - DADOS EXPERIMENTAIS DO MÉTODO IODOMÉTRICO

FLUXIMETRO CAPILAR DEFLEXÃO (mm)			VAZÕES (cm ³ / s)			COMPOSIÇÃO (%)	td [*] (min)	CILINDRO MISTURA
DHa	DHo	DHwa	Ga	Gw	Gwa			
15,6	5,9	13,1	87,0	20,0	61,0	0,0953	11,15	0,51% SO ₂
15,5	5,9	13,1	86,0	20,0	61,0	0,0962	11,22	
15,5	5,8	13,0	86,0	20,0	60,0	0,0962	11,31	
15,5	5,7	13,0	86,0	19,5	60,0	0,0943	11,02	
9,9	5,8	13,1	55,5	20,0	61,0	0,1351	8,22	0,51% SO ₂
9,9	5,8	12,8	56,0	20,0	60,0	0,1342	8,54	
9,9	5,8	13,2	56,0	20,0	62,0	0,1342	8,10	
10,0	5,8	13,1	56,5	20,0	61,0	0,1333	8,59	
12,1	12,8	13,0	63,0	44,0	60,0	0,2097	6,20	0,51% SO ₂
12,2	12,9	13,1	63,5	44,5	61,0	0,2101	6,11	
12,2	12,9	13,0	63,5	44,5	60,0	0,2101	6,09	
12,2	13,1	13,0	63,5	45,0	60,0	0,2115	6,29	
12,2	12,9	13,0	63,5	44,5	60,0	0,2101	6,15	
12,3	12,9	13,0	64,0	44,5	60,0	0,2092	6,14	
12,3	12,9	13,0	64,0	44,5	60,0	0,2092	6,22	
12,4	13,0	13,0	64,5	44,5	60,0	0,2082	6,30	
10,8	4,7	13,1	61,0	16,0	61,0	0,2701	5,10	1,3% SO ₂
10,8	4,7	13,0	61,0	16,0	60,0	0,2701	5,23	
10,8	4,7	13,0	61,0	16,0	60,0	0,2701	5,13	
10,8	4,7	13,0	61,0	16,0	60,0	0,2701	5,12	
10,7	4,7	13,1	60,5	16,0	61,0	0,2719	5,22	
10,7	4,7	13,0	60,5	15,5	60,0	0,2651	5,20	
10,7	4,6	13,1	60,5	15,5	61,0	0,2651	5,24	
10,7	4,5	13,1	60,5	15,5	61,0	0,2651	5,25	
62,0	22,3	13,0	35,0	64,0	60,0	0,3297	4,55	0,51% SO ₂
63,0	22,2	13,0	35,5	63,5	60,0	0,3271	4,55	
62,0	22,2	13,2	35,0	63,5	62,0	0,3288	4,44	
62,0	22,2	13,0	35,0	63,5	60,0	0,3288	4,64	
62,0	22,2	13,1	35,0	63,5	61,0	0,3288	4,55	
62,0	22,1	13,0	34,5	63,0	60,0	0,3295	4,40	
62,0	22,1	13,0	35,0	63,0	60,0	0,3279	4,55	
11,4	10,9	13,4	64,0	37,0	62,5	0,4762	3,58	1,3% SO ₂
11,6	11,1	13,2	65,0	38,5	62,0	0,4836	3,48	
11,7	11,0	13,3	65,5	38,0	62,0	0,4773	3,49	
11,8	11,0	13,2	66,0	38,0	62,0	0,4750	3,48	
11,8	11,0	13,1	66,0	38,0	61,0	0,4750	3,61	
12,0	11,0	13,1	67,0	38,0	61,0	0,4705	3,41	
12,1	11,0	13,1	67,5	38,0	61,0	0,4682	3,66	
12,2	10,9	13,1	68,0	37,0	61,0	0,4581	3,58	
12,3	10,9	13,1	69,0	37,0	61,0	0,4538	3,48	
12,4	10,9	13,1	69,0	37,0	61,0	0,4538	3,57	
12,4	10,9	13,3	69,0	37,0	62,0	0,4538	3,52	
12,5	10,9	13,3	70,0	37,0	62,0	0,4495	3,43	

continua

18,6	5,6	13,2	62,0	32,0	62,0	0,4426	3,83	1,3% SO ₂
18,6	5,4	13,2	62,0	30,5	62,0	0,4286	3,72	
18,5	5,3	13,2	62,0	30,0	62,0	0,4239	3,79	
18,4	5,4	13,2	61,0	30,5	62,0	0,4333	3,87	
18,4	5,4	13,1	61,0	30,5	61,0	0,4333	3,80	
18,0	5,2	13,0	60,0	29,5	60,0	0,4285	3,87	
17,6	5,3	13,1	59,0	30,0	61,0	0,4382	3,78	
17,6	5,2	13,1	59,0	29,5	61,0	0,4333	3,82	
17,9	7,6	13,0	60,0	43,0	60,0	0,5427	3,34	1,3% SO ₂
17,8	7,7	13,0	59,5	43,0	60,0	0,5454	3,29	
17,8	7,7	12,9	59,5	43,5	60,0	0,5490	3,32	
17,6	7,7	13,0	59,0	43,5	60,0	0,5517	3,33	
17,7	7,7	13,2	59,0	43,5	62,0	0,5517	3,32	
*	*	13,0	*	*	60,0	0,5100	3,43	0,51% SO ₂
*	*	13,2	*	*	62,0	0,5100	3,31	
*	*	13,1	*	*	61,0	0,5100	3,39	
*	*	13,0	*	*	60,0	0,5100	3,48	
*	*	13,1	*	*	61,0	0,5100	3,44	
*	*	13,1	*	*	61,0	0,5100	3,32	
*	*	13,0	*	*	60,0	0,5100	3,36	
*	*	13,1	*	*	61,0	0,5100	3,35	
*	*	13,5	*	*	63,0	0,5100	3,40	
*	*	13,1	*	*	61,0	0,5100	3,42	
*	*	13,1	*	*	61,0	0,5100	3,44	
*	*	13,1	*	*	61,0	0,5100	3,47	
*	*	13,0	*	*	60,0	0,5100	3,46	
*	*	13,1	*	*	61,0	0,5100	3,41	
*	*	13,1	*	*	61,0	0,5100	3,32	
*	*	13,0	*	*	60,0	0,5100	3,45	
*	*	13,3	*	*	60,0	0,5100	3,44	
*	*	13,1	*	*	61,0	0,5100	3,52	
*	*	13,1	*	*	61,0	0,5100	3,44	
16,2	8,5	13,1	55,0	48,0	61,0	0,6058	3,22	1,3% SO ₂
16,2	8,5	13,1	55,0	48,0	61,0	0,6058	3,15	
16,2	8,5	13,2	55,0	48,0	62,0	0,6058	3,16	
16,1	8,5	13,1	54,5	48,0	61,0	0,6088	3,22	
16,1	8,5	13,1	54,5	48,0	61,0	0,6088	3,14	
16,2	8,5	13,1	55,0	48,0	61,0	0,6058	3,29	
16,1	8,5	13,1	54,5	48,0	61,0	0,6088	3,15	
16,2	8,5	13,1	55,0	48,0	61,0	0,6058	3,08	
16,2	8,5	13,1	55,0	48,0	61,0	0,6058	3,28	
16,1	8,5	13,2	54,5	48,0	62,0	0,6088	3,18	
16,1	8,5	13,2	54,5	48,0	62,0	0,6088	3,22	
16,0	8,5	13,3	54,0	48,0	62,0	0,6118	3,15	
8,0	15,1	13,1	45,0	51,0	61,0	0,6906	2,01	1,3% SO ₂
8,0	15,3	13,2	45,0	52,0	61,0	0,6969	2,02	
8,0	15,1	13,0	45,0	51,0	61,0	0,6906	2,95	
8,0	15,0	13,2	45,0	51,0	61,0	0,6906	2,94	

continua

7,8	15,6	13,1	44,0	53,0	61,0	0,7103	2,94	1,3% SO ₂
7,9	15,5	13,0	44,5	52,5	61,0	0,7036	2,96	
7,9	15,4	13,1	44,5	52,0	61,0	0,7005	2,96	
7,9	15,4	13,1	44,5	52,0	61,0	0,7005	2,97	
13,4	9,4	13,2	46,0	53,0	62,0	0,6960	3,01	1,3% SO ₂
13,4	9,4	13,3	46,0	53,0	62,0	0,6960	3,02	
13,4	9,4	13,4	46,0	53,0	62,5	0,6960	2,88	
13,5	9,4	13,2	46,5	53,0	62,0	0,6925	2,86	
13,5	9,4	13,2	46,5	53,0	62,0	0,6925	2,90	
13,7	9,4	13,2	47,0	53,0	62,0	0,6890	2,88	
13,7	9,4	13,1	47,0	53,0	61,0	0,6890	2,97	
13,7	9,4	13,2	47,0	53,0	62,0	0,6890	2,88	
10,4	11,3	13,1	35,5	63,5	61,0	0,8338	2,75	1,3% SO ₂
10,4	11,2	13,1	35,5	63,5	61,0	0,8338	2,79	
10,3	11,2	13,2	35,0	63,5	62,0	0,8381	2,73	
10,3	11,2	13,2	35,0	63,0	62,0	0,8357	2,72	
10,3	11,2	13,2	35,0	63,0	62,0	0,8357	2,72	
10,3	11,2	13,3	35,0	63,0	62,0	0,8357	2,87	
10,3	11,2	13,1	35,0	63,0	61,0	0,8357	2,77	
3,0	20,4	13,3	17,0	66,0	62,0	1,0400	2,50	1,3% SO ₂
3,0	20,1	13,2	17,0	66,5	62,0	1,0353	2,53	
3,0	20,1	13,1	17,0	66,5	61,0	1,0353	2,48	
2,9	19,8	13,1	16,5	66,0	62,0	1,0400	2,46	
2,9	19,9	13,1	16,5	66,0	62,0	1,0400	2,44	
2,9	19,8	13,0	16,5	66,0	62,0	1,0400	2,46	
2,9	19,8	13,0	16,5	66,0	62,0	1,0400	2,45	
+	+	13,1	+	+	61,0	1,3000	2,25	1,3% SO ₂
+	+	13,0	+	+	60,0	1,3000	2,24	
+	+	13,0	+	+	60,0	1,3000	2,26	
+	+	13,0	+	+	60,0	1,3000	2,25	
+	+	13,0	+	+	60,0	1,3000	2,26	
+	+	13,0	+	+	60,0	1,3000	2,26	

* utilizou-se diretamente o cilindro de mistura com 0,51% de SO₂

+ utilizou-se diretamente o cilindro de mistura com 1,3% de SO₂

td - Tempo de Descoloramento

IV.1.2 - CURVA DE CALIBRAÇÃO

A figura 10 mostra a curva de calibração para determinar a quantidade do gás dióxido de enxofre(SO_2) em função do tempo de descoloramento da solução.

A curva tem uma forma assintótica e a equação encontrada para o seu ajuste não tem um fundamento teórico. Então, uma outra forma de obtenção dos resultados, é através da figura 11.

A figura 11 apresenta o inverso da quantidade do gás dióxido de enxofre(SO_2) em função do tempo de descoloramento da solução, obtendo-se, assim, uma equação(2) simples e de fácil manuseio.

$$Z = -1,445 + 0,9457*t_d + 0,01107*(t_d)^2 \quad (2)$$

onde:

Z = 1/fracção molar do dióxido de enxofre(SO_2)

t_d = tempo de descoloramento da solução (min)

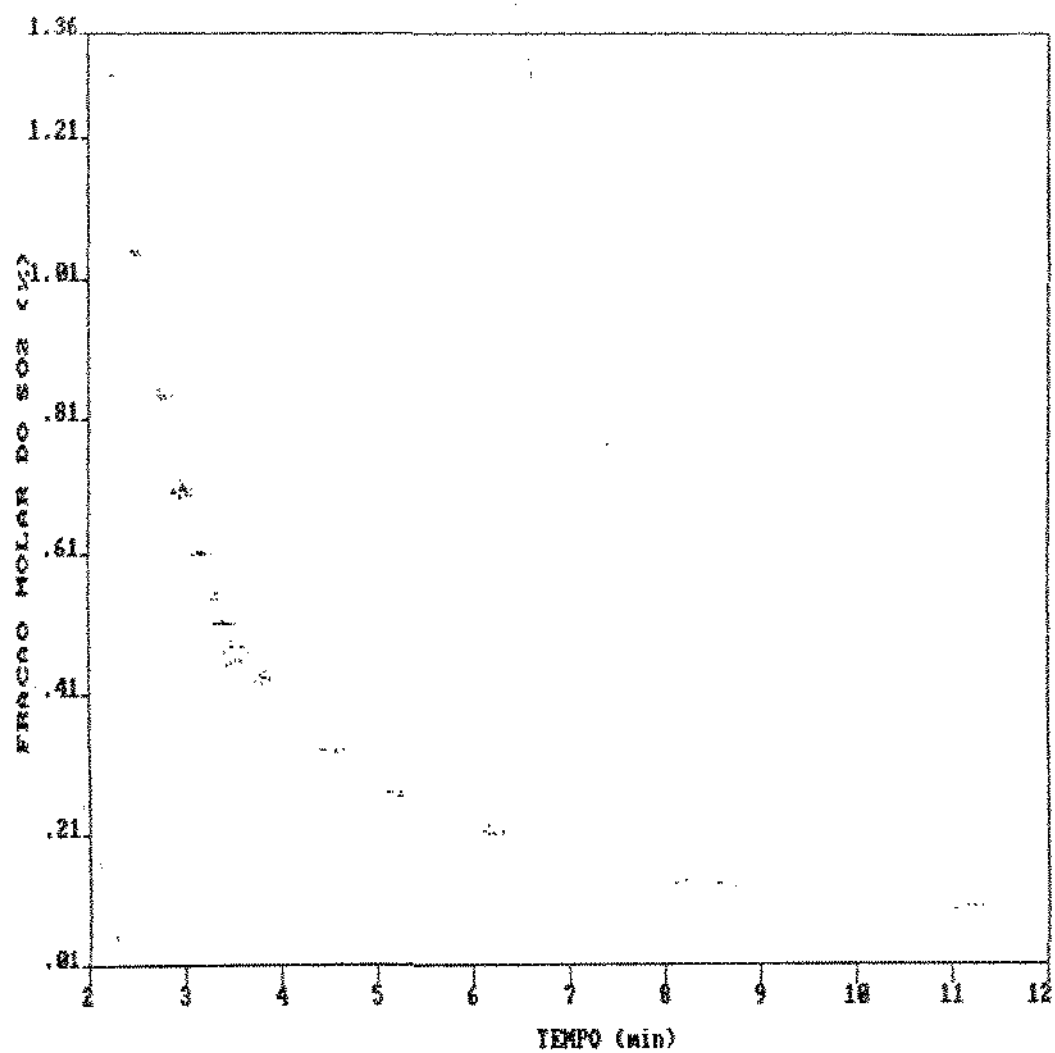


FIGURA 10: CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA ANÁLISE DO
DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO₂)

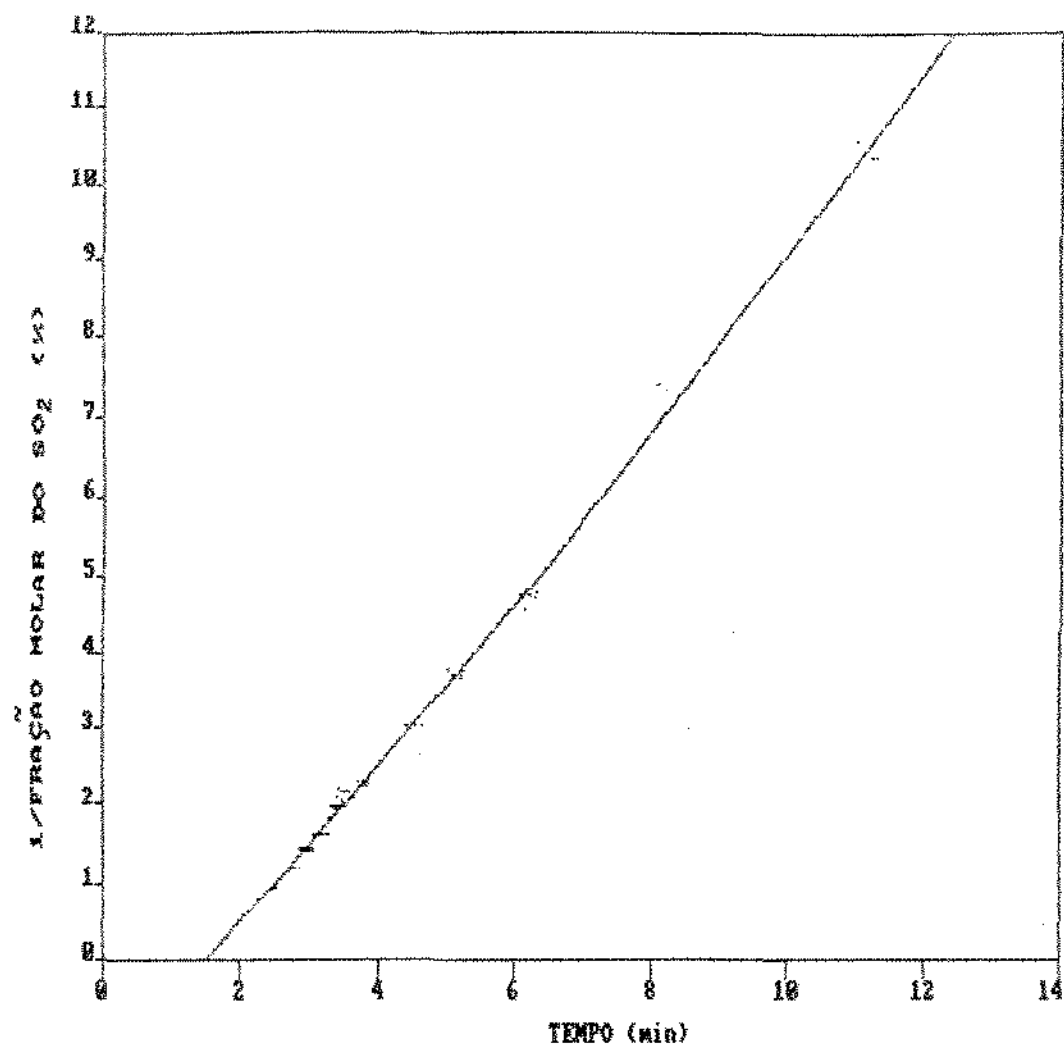


FIGURA 11: CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA ANÁLISE DO DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO_2)

IV.2 - PARÂMETROS ENVOLVIDOS NO SISTEMA DE ADSORÇÃO

IV.2.1 - CÁLCULO DAS VARIÁVEIS PARA O SISTEMA FLUIDODINÂMICO

IV.2.1.1 - DETERMINAÇÃO DA ALTURA DO LEITO

A análise para obtenção das alturas iniciais do leito faz-se através da observação visual numa escala milimétrica anexada ao vaso da fluidização.

As alturas foram escolhidas em função do comportamento dinâmico perceptível, sem haver o transporte de matéria particulada. Sendo elas: 2, 3 e 4 cm.

As variações das alturas do leito dependem das mudanças da vazão e queda de pressão fornecido ao sistema. A leitura faz-se com a mesma escala milimétrica utilizada acima.

IV.2.1.2 - DETERMINAÇÃO DA MASSA DE SÓLIDO(CARVÃO ATIVADO)

Estipuladas as alturas do leito, mede-se com um balança elétrica digital semi-analítica, modelo Libror, fabricado pela Instrumentos Científicos C.G. LTDA-SP., as massas de carvão correspondentes. Obtêm-se, assim, a seguinte relação entre altura do leito e massa de sólido(carvão):

L_0 (cm)	M_s (g)
2,0	13
3,0	20
4,0	27

IV.2.1.3 - DETERMINAÇÃO DA VAZÃO

As vazões foram determinadas experimentalmente por dois(2) fluxímetros capilares, sendo estes calibrados com um fluxímetro de bolhas.

O cálculo da vazão faz-se da relação entre o volume e o tempo percorrido pela bolha.

Com os dados coletados constrói-se um gráfico de vazão em função da deflexão no fluxímetro capilar.

Com isso, sabe-se os limites de medição pelo capilar em função do fluido manométrico utilizado.

IV.2.1.4 - DETERMINAÇÃO DA QUEDA DE PRESSÃO

Para a determinação da queda de pressão no leito fluidizado, utiliza-se medidas experimentais de deflexão num manômetro diferencial.

IV.2.1.5 - DETERMINAÇÃO DOS TAMANHOS DE PARTÍCULA

A escolha dos tamanhos de partícula foi feita em função da altura do leito, massa de sólido, variação de pressão e vazão utilizados no sistema. Os tamanhos são definidos através dos diâmetros médios, sendo eles, respectivamente:

MESH TYLER	Dp (cm)
-42 + 60	0,030
-60 + 65	0,023
-65 + 100	0,018

IV.2.1.6 - DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE

As densidades aparentes das partículas sólidas determinam-se, experimentalmente, através de um picnômetro, tendo a água como solvente padrão. Obtêm-se os valores correspondentes:

D_p (cm)	ρ_s (g/cm ³)
0,030	1,1307
0,023	1,1752
0,018	1,2436

IV.2.1.7 - DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE DO LEITO

Com o sistema em operação, conforme a figura B, torna-se necessário a obtenção da expansão do leito fluidizado.

Partindo da consideração da mistura gás-sólido apresentar uma porosidade constante ao longo da seção transversal do tubo, então pode-se determinar por um método simplificado, onde:

$$E = \frac{V_{\text{vazios}}}{V_{\text{total}}} = \frac{V_{\text{total}} - V_{\text{sólidos}}}{V_{\text{total}}} = \frac{1 - V_{\text{sólidos}}}{V_{\text{total}}} = \frac{1 - \frac{M_s}{\rho_s}}{L \cdot A} \quad (3)$$

sendo:

$V_{\text{sólidos}}$ = volume de sólidos no leito

V_{total} = volume de total do leito

V_{vazios} = volume de vazios no leito

M_s = massa do sólido

ρ_s = densidade aparente do sólido

L = altura do leito

A = área da seção transversal do tubo

IV.2.1.8 - DADOS EXPERIMENTAIS E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA

A tabela de fluidização 5 mostra o conjunto de dados coletados e calculados no experimento.

Os valores das constantes físicas foram retiradas da referência 50.

As figuras de 12 a 20 são as transposições dos dados experimentais que constam na tabela 5.

TABELA 5 - TABELA DE DADOS DA FLUIDIZAÇÃO

D_p (cm)	M_s (g)	ρ_s (g/cm ³)	L (cm)	E	Q (cm ³ /s)	v (cm/s)	Re	DH_p (cm)	DH_p (cm)	DH_i (cm)	ΔP (dina/cm ²)	L_0/L
0,030	13,0	1,1307	2,00	0,7861	32,60	1,21	50,96	0,70	0,20	0,50	553,97	1,00
	13,0	1,1307	2,10	0,7963	44,40	1,65	69,41	0,90	0,30	0,60	664,77	0,95
	13,0	1,1307	2,10	0,7963	60,90	2,27	95,20	1,00	0,40	0,60	664,77	0,95
	13,0	1,1307	2,20	0,8056	67,40	2,51	105,36	1,10	0,50	0,60	664,77	0,91
	13,0	1,1307	2,20	0,8056	77,80	2,89	121,62	1,20	0,60	0,60	664,77	0,91
	13,0	1,1307	2,30	0,8140	85,00	3,16	132,87	1,20	0,60	0,60	664,77	0,87
0,030	20,0	1,1307	3,00	0,7806	32,60	1,21	50,96	0,90	0,20	0,70	775,56	1,00
	20,0	1,1307	3,10	0,7877	44,40	1,65	69,41	1,20	0,30	0,90	997,15	0,97
	20,0	1,1307	3,20	0,7943	60,90	2,27	95,20	1,40	0,40	1,00	1107,95	0,94
	20,0	1,1307	3,30	0,8006	67,40	2,51	105,36	1,50	0,50	1,00	1107,95	0,91
	20,0	1,1307	3,40	0,8064	77,80	2,89	121,62	1,60	0,60	1,00	1107,95	0,88
	20,0	1,1307	3,50	0,8120	85,00	3,16	132,87	1,60	0,60	1,00	1107,95	0,86
0,030	27,0	1,1307	4,10	0,7833	32,60	1,21	50,96	1,20	0,20	1,00	1107,95	0,98
	27,0	1,1307	4,20	0,7885	44,40	1,65	69,41	1,50	0,30	1,20	1329,54	0,95
	27,0	1,1307	4,30	0,7934	60,90	2,27	95,20	1,70	0,40	1,30	1440,33	0,93
	27,0	1,1307	4,40	0,7981	67,40	2,51	105,36	1,80	0,50	1,30	1440,33	0,91
	27,0	1,1307	4,50	0,8026	77,80	2,89	121,62	1,90	0,60	1,30	1440,33	0,89
	27,0	1,1307	4,60	0,8069	85,00	3,16	132,87	1,90	0,60	1,30	1440,33	0,87
0,023	13,0	1,1752	2,10	0,8040	32,60	1,21	50,96	0,70	0,20	0,50	575,80	0,95
	13,0	1,1752	2,20	0,8129	44,40	1,65	69,41	0,90	0,30	0,60	690,96	0,91
	13,0	1,1752	2,30	0,8211	60,90	2,27	95,20	1,00	0,40	0,60	690,96	0,87
	13,0	1,1752	2,30	0,8211	67,40	2,51	105,36	1,10	0,50	0,60	690,96	0,87
	13,0	1,1752	2,40	0,8285	77,80	2,89	121,62	1,20	0,60	0,60	690,96	0,83
	13,0	1,1752	2,50	0,8354	85,00	3,16	132,87	1,20	0,60	0,60	690,96	0,80
0,023	20,0	1,1752	3,30	0,8081	32,60	1,21	50,96	1,00	0,20	0,80	921,28	0,91
	20,0	1,1752	3,45	0,8165	44,40	1,65	69,41	1,20	0,30	0,90	1036,44	0,87
	20,0	1,1752	3,55	0,8216	60,90	2,27	95,20	1,30	0,40	0,90	1036,44	0,85
	20,0	1,1752	3,70	0,8289	67,40	2,51	105,36	1,40	0,50	0,90	1036,44	0,81
	20,0	1,1752	3,80	0,8334	77,80	2,89	121,62	1,50	0,60	0,90	1036,44	0,79
	20,0	1,1752	3,90	0,8376	85,00	3,16	132,87	1,50	0,60	0,90	1036,44	0,77
0,023	27,0	1,1752	4,40	0,8057	32,60	1,21	50,96	1,40	0,20	1,20	1381,92	0,91
	27,0	1,1752	4,60	0,8142	44,40	1,65	69,41	1,50	0,30	1,20	1381,92	0,87
	27,0	1,1752	5,00	0,8290	60,90	2,27	95,20	1,60	0,40	1,20	1381,92	0,80
	27,0	1,1752	5,10	0,8324	67,40	2,51	105,36	1,70	0,50	1,20	1381,92	0,78
	27,0	1,1752	5,20	0,8356	77,80	2,89	121,62	1,80	0,60	1,20	1381,92	0,77
	27,0	1,1752	5,30	0,8387	85,00	3,16	132,87	1,80	0,60	1,20	1381,92	0,75
0,018	13,0	1,2436	2,50	0,8444	32,60	1,21	50,96	0,60	0,20	0,40	487,48	0,80
	13,0	1,2436	2,60	0,8504	44,40	1,65	69,41	0,80	0,30	0,50	609,35	0,77
	13,0	1,2436	2,70	0,8560	60,90	2,27	95,20	0,90	0,40	0,50	609,35	0,74
	13,0	1,2436	2,80	0,8611	67,40	2,51	105,36	1,00	0,50	0,50	609,35	0,71
	13,0	1,2436	2,90	0,8659	77,80	2,89	121,62	1,10	0,60	0,50	609,35	0,69
	13,0	1,2436	3,00	0,8704	85,00	3,16	132,87	1,20	0,60	0,60	731,22	0,67

continua

0,018	20,0	1,2436	3,70	0,8383	32,60	1,21	50,96	0,90	0,20	0,70	853,09	0,81
	20,0	1,2436	3,90	0,8466	44,40	1,65	69,41	1,00	0,30	0,70	853,09	0,77
	20,0	1,2436	4,00	0,8504	60,90	2,27	95,20	1,10	0,40	0,70	853,09	0,75
	20,0	1,2436	4,10	0,8541	67,40	2,51	105,36	1,20	0,50	0,70	853,09	0,73
	20,0	1,2436	4,30	0,8608	77,80	2,89	121,62	1,40	0,60	0,80	974,96	0,70
	20,0	1,2436	4,40	0,8640	85,00	3,16	132,87	1,50	0,60	0,90	1096,83	0,68
0,018	27,0	1,2436	5,00	0,8384	32,60	1,21	50,96	1,20	0,20	1,00	1218,70	0,80
	27,0	1,2436	5,20	0,8447	44,40	1,65	69,41	1,40	0,30	1,10	1340,57	0,77
	27,0	1,2436	5,50	0,8531	60,90	2,27	95,20	1,50	0,40	1,10	1340,57	0,73
	27,0	1,2436	5,70	0,8583	67,40	2,51	105,36	1,60	0,50	1,10	1340,57	0,70
	27,0	1,2436	5,80	0,8607	77,80	2,89	121,62	1,80	0,60	1,20	1462,44	0,69
	27,0	1,2436	5,90	0,8631	85,00	3,16	132,87	1,80	0,60	1,20	1462,44	0,68

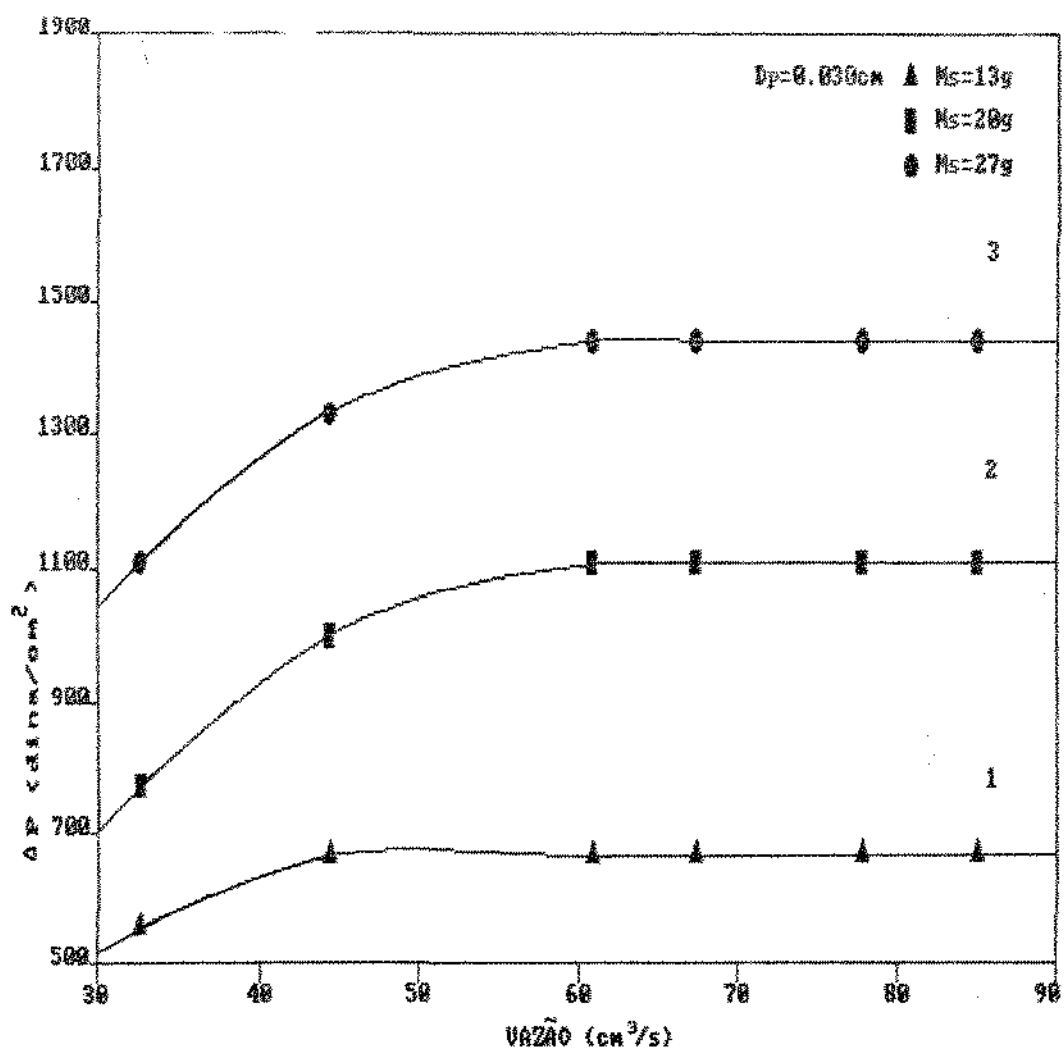


FIGURA 12: QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO FLUIDIZADO

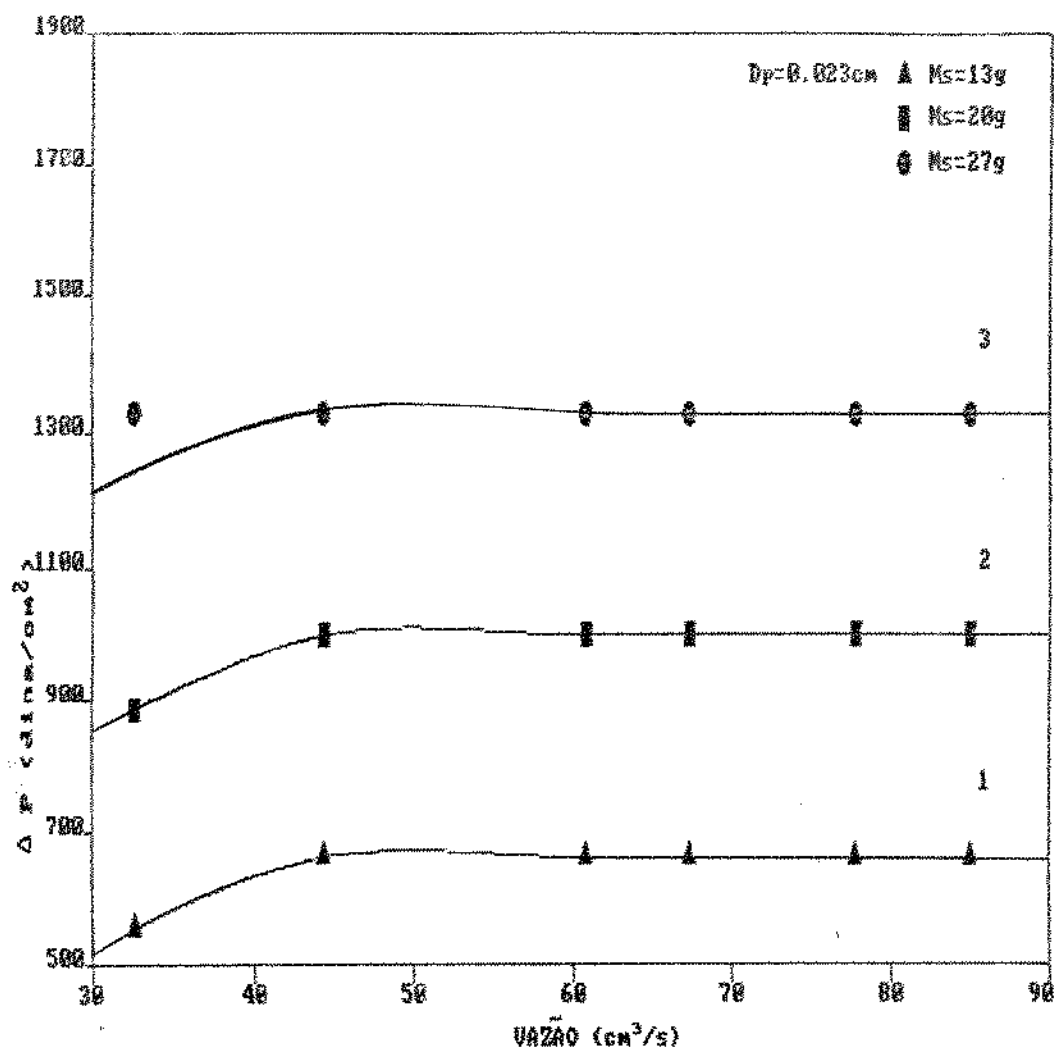


FIGURA 13: QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO FLUIDIZADO

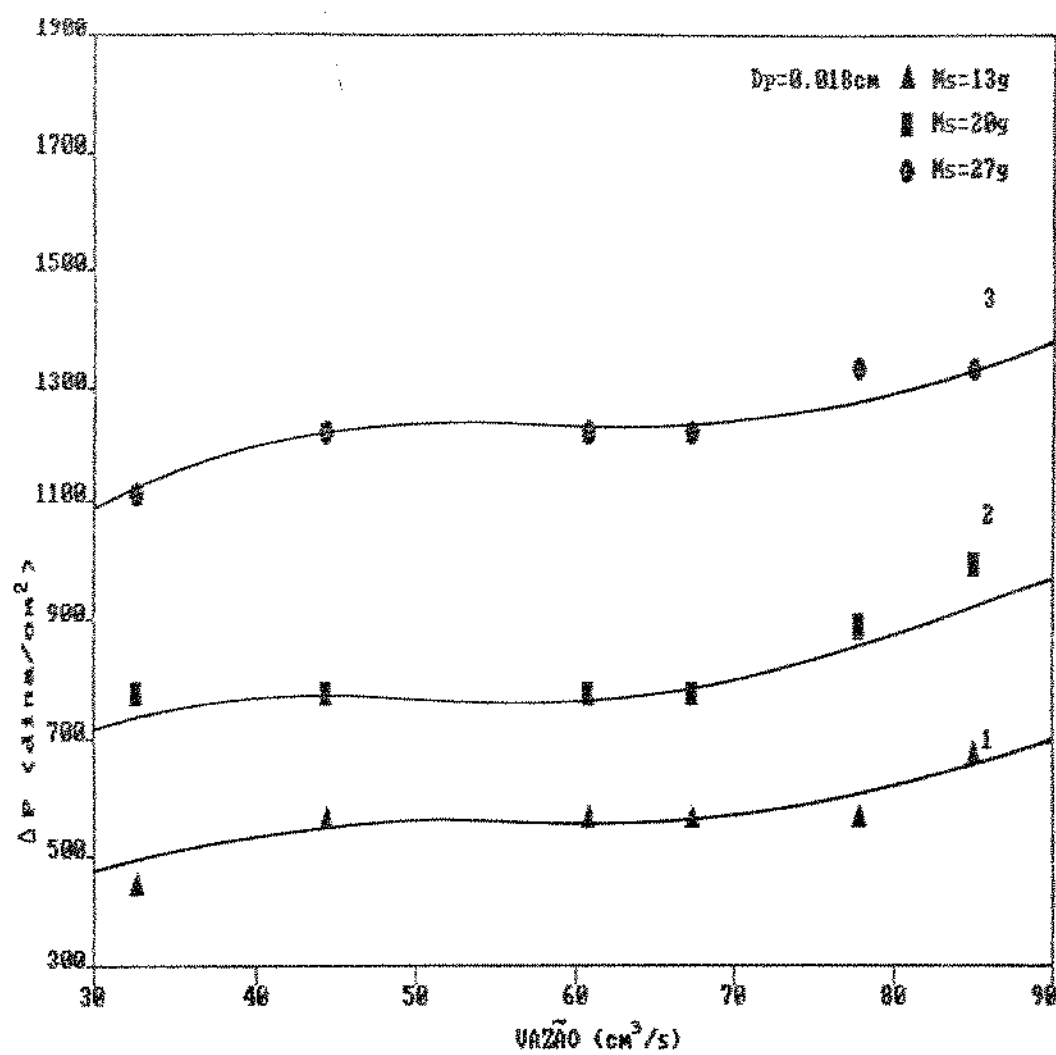


FIGURA 14: QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO FLUIDIZADO

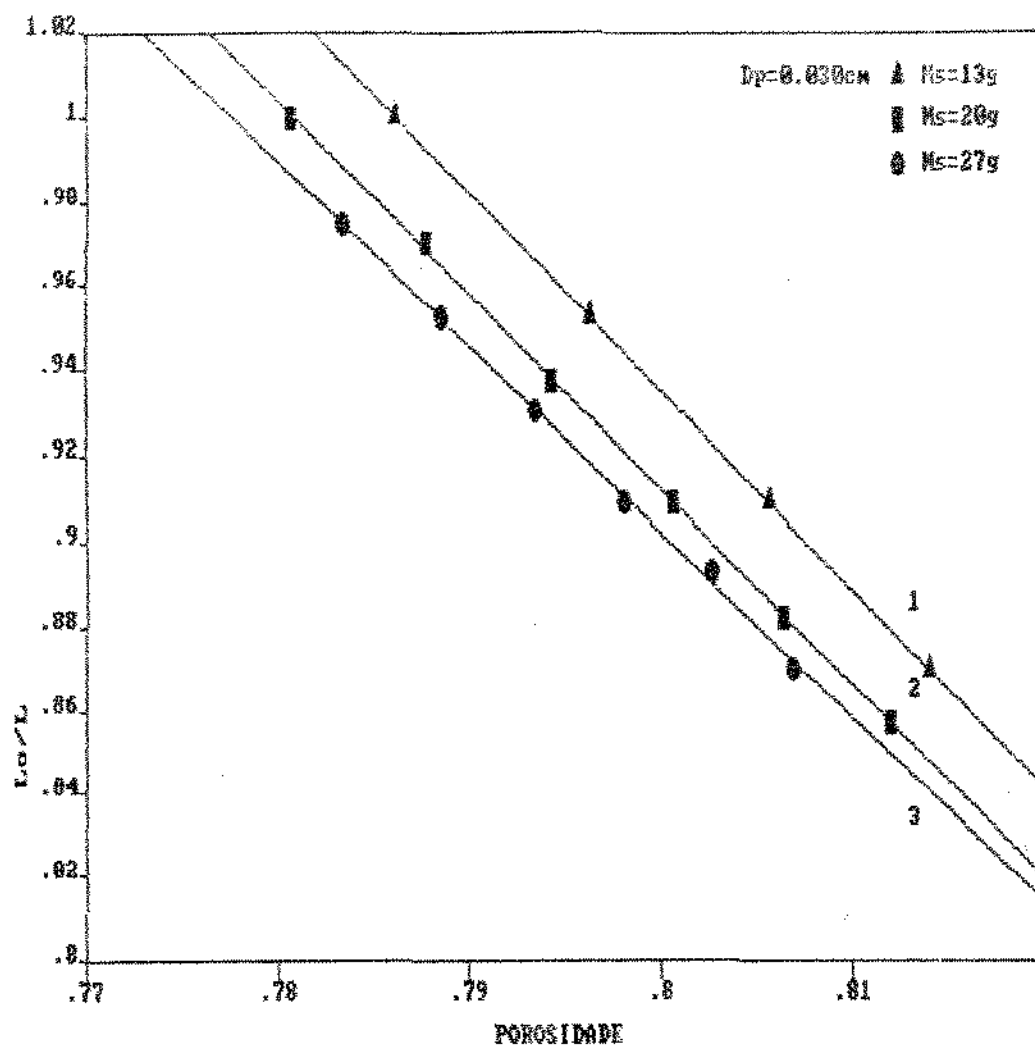


FIGURA 15: VARIAÇÃO DA ALTURA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DA POROSIDADE

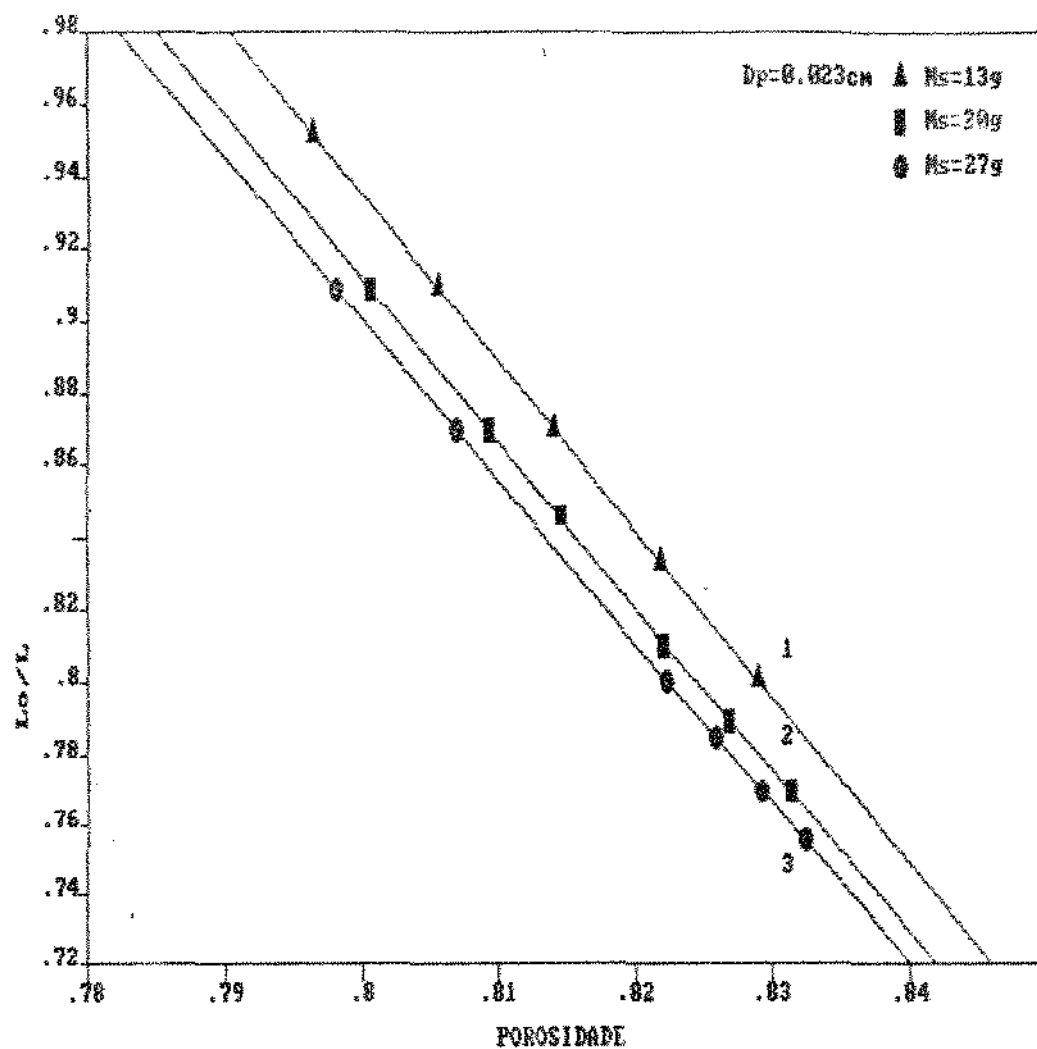


FIGURA 16: VARIAÇÃO DA ALTURA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DA POROSIDADE

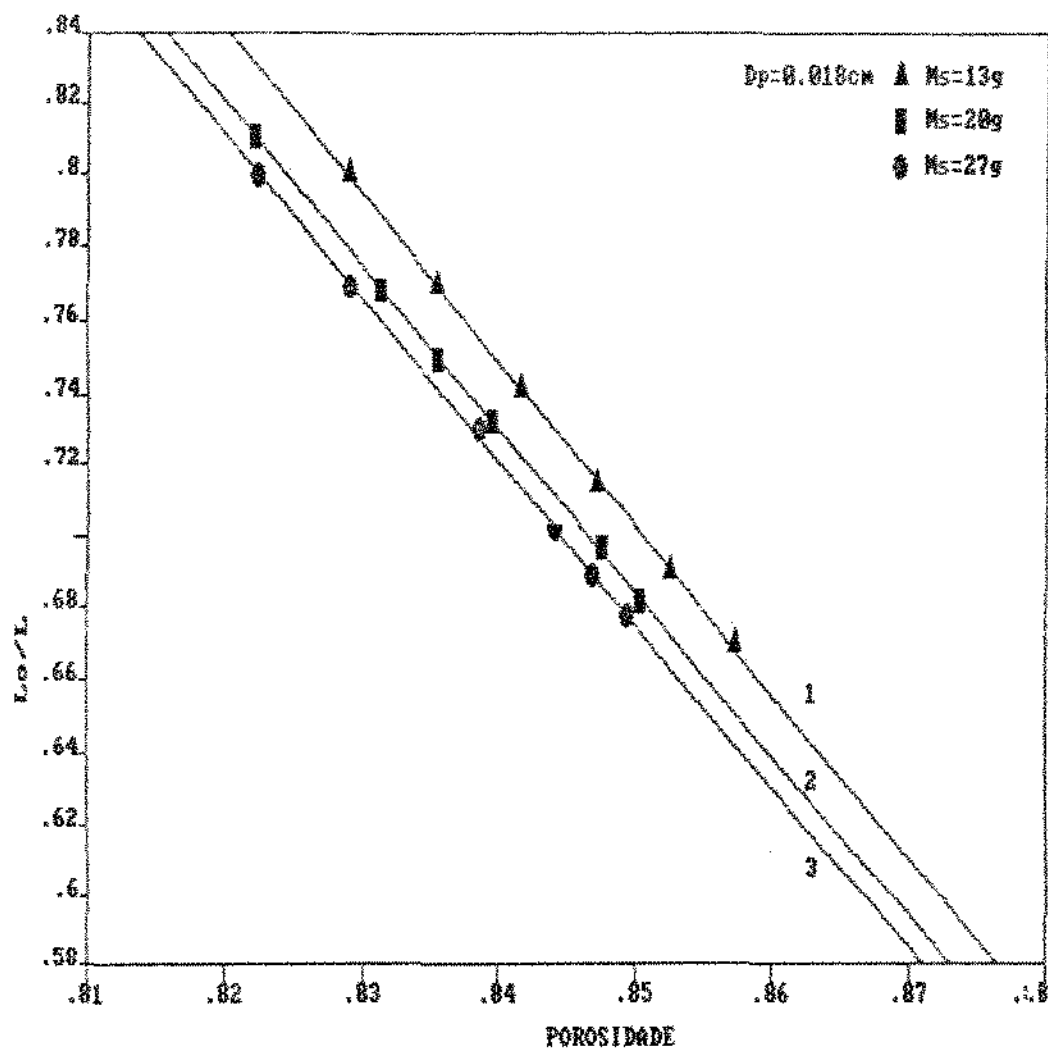


FIGURA 17: VARIAÇÃO DA ALTURA DO LEITO FLUIDIZADO
EM FUNÇÃO DA POROSIDADE

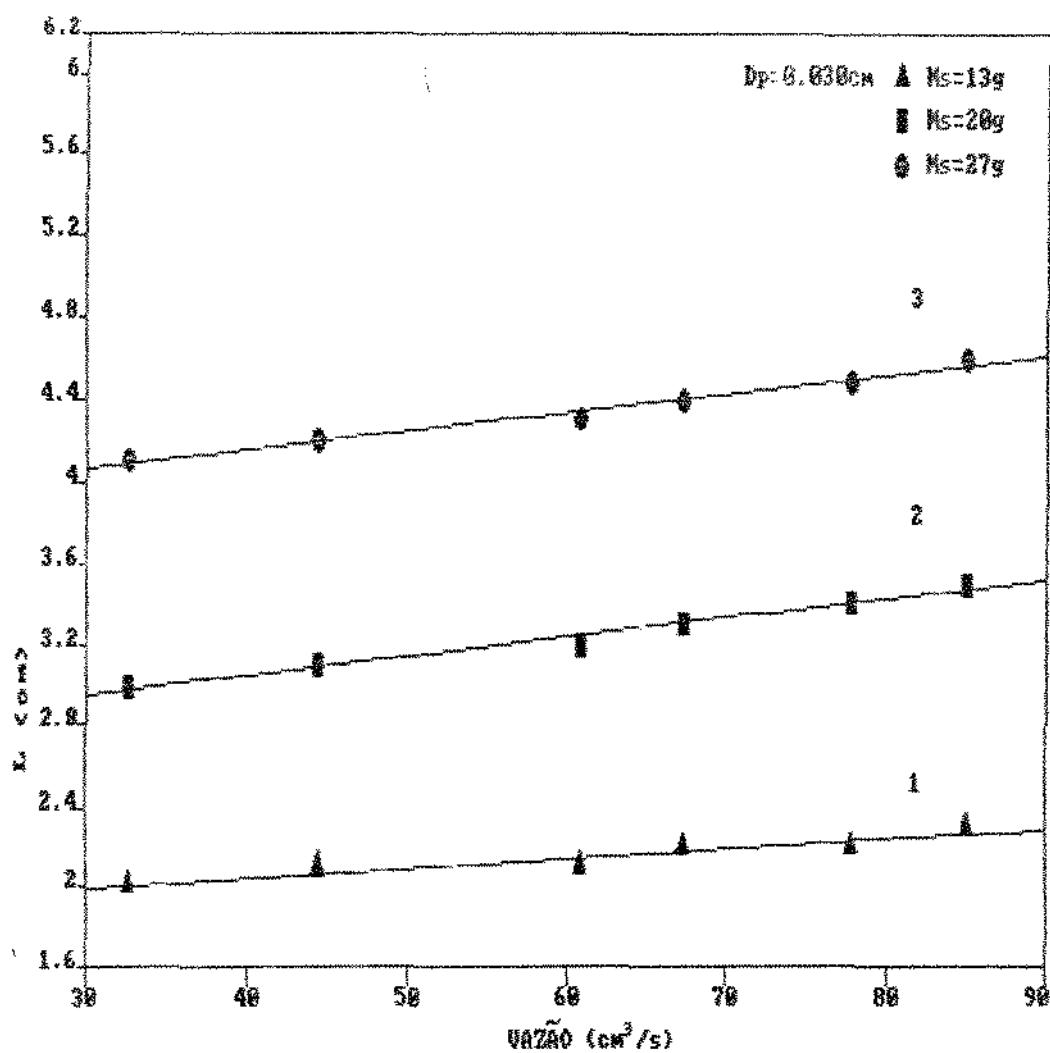


FIGURA 18: EXPANSÃO DO LEITO FLUIDIZADO

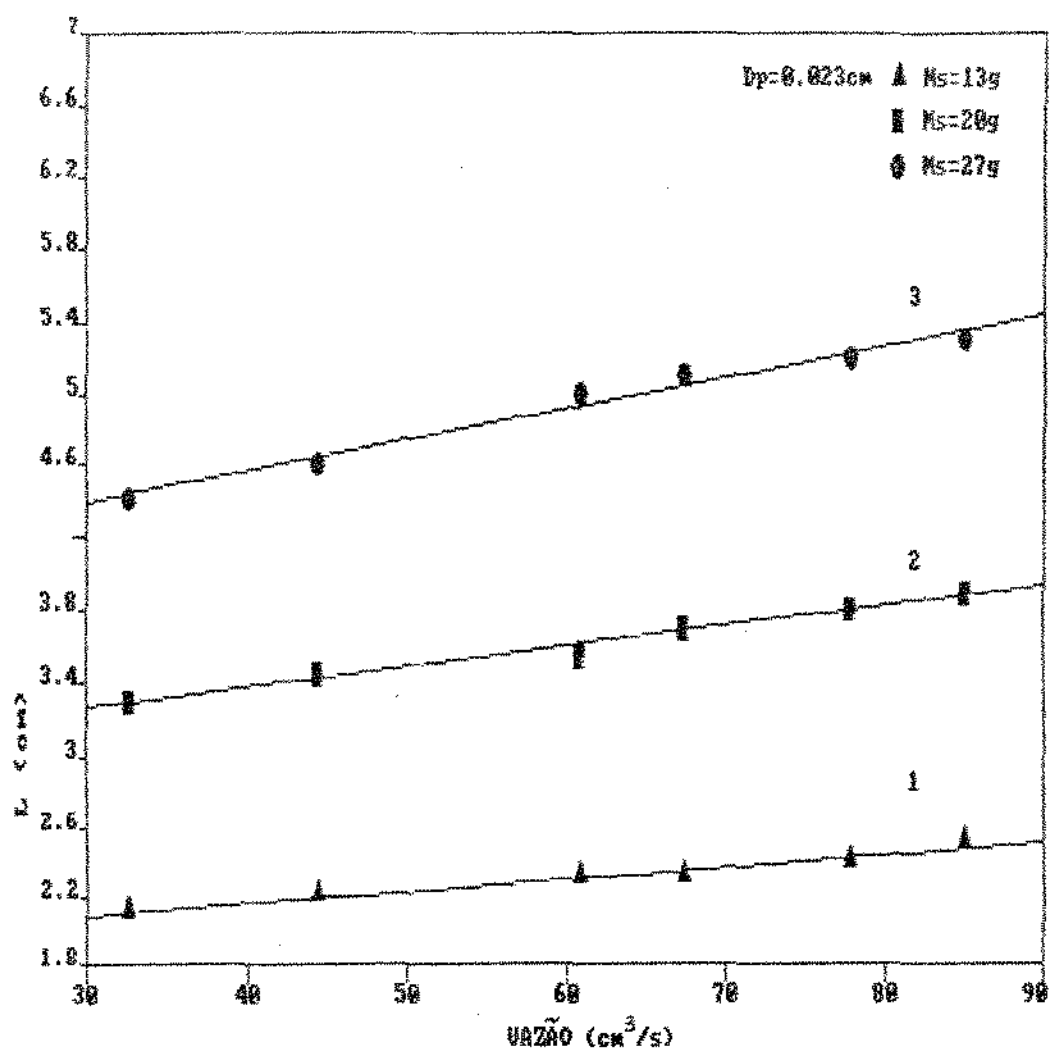


FIGURA 19: EXPANSÃO DO LEITO FLUIDIZADO

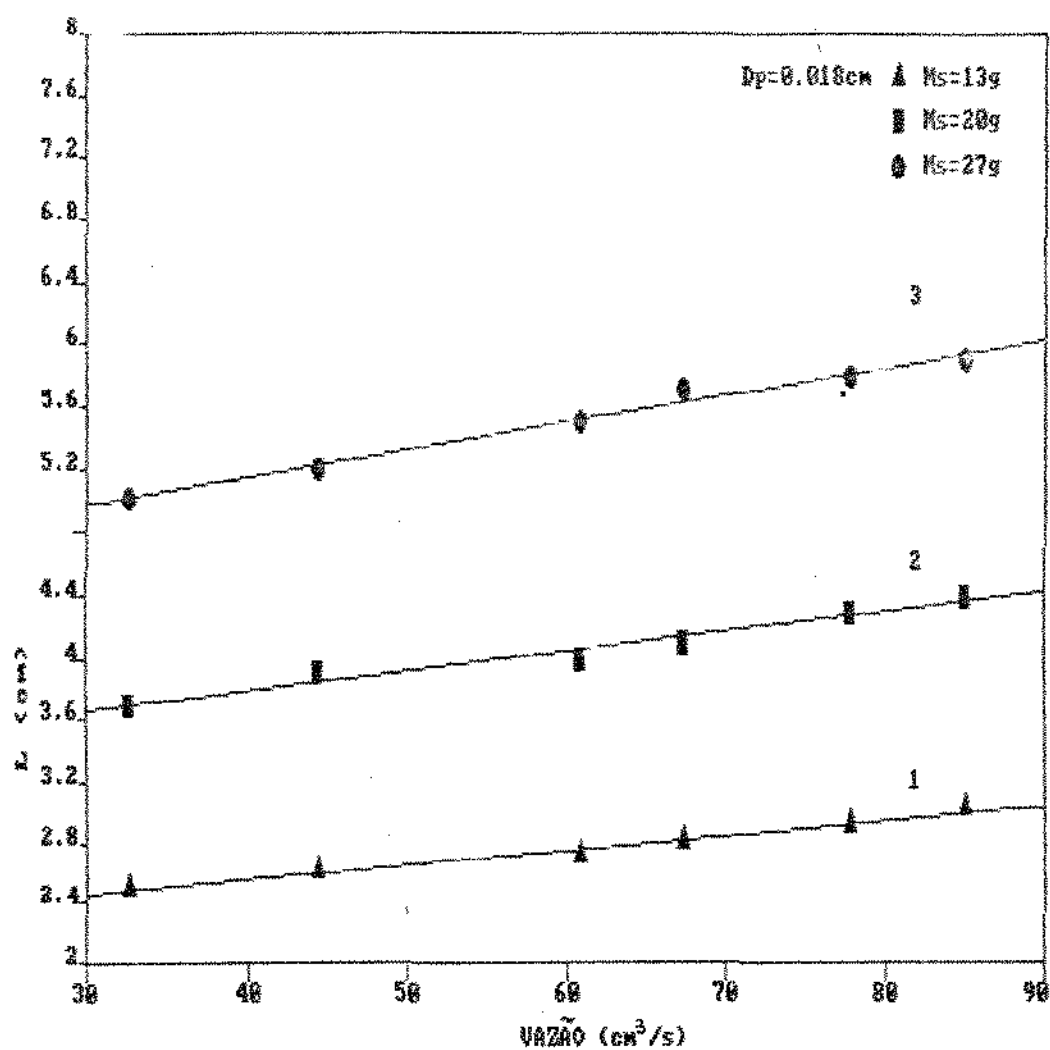


FIGURA 20: EXPANSÃO DO LEITO FLUIDIZADO

IV.2.2 - CÁLCULO DAS VARIÁVEIS PARA A CINÉTICA DE ADSORÇÃO NUM CICLO FECHADO

As determinações dos diâmetros de partículas, massa de sólido, vazão, tempo de descoloramento da solução e fração molar do gás dióxido de enxofre já foram avaliadas anteriormente neste capítulo.

Este item procura abordar os parâmetros relacionados com a adsorção do gás dióxido de enxofre em relação a quantidade de massa do adsorvente(carvão ativado).

IV.2.2.1- DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE MOLES ADSORVIDO

O número de moles adsorvido no leito de carvão ativado determina-se em função das frações molares e o número de moles total, ou seja,

$$n_{ads} = (y_0 - y) * n_t \quad (4)$$

onde:

- n_{ads} = número de moles adsorvido à cada ciclo
- y_0 = fração molar inicial do gás
- y = fração molar do gás após o leito à cada ciclo
- n_t = n° de moles total por unidade de tempo

Considerando a mistura gasosa como um gás ideal e aplicando a lei dos gases ideais, determina-se o número de moles total por unidade de tempo.

Os dados para este cálculo são experimentais, sendo a pressão do sistema em torno de $2,54 \times 10^{-6}$ dina/cm² e à temperatura de 25°C.

IV.2.2.2 - DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE MOLES POR MASSA DE ADSORVENTE E TEMPO DE ADSORÇÃO

O cálculo do número de moles por massa de adsorvente e o tempo de adsorção à cada ciclo faz-se de maneira simples e direta. Os dados necessários estão incluídos na tabela(6).

IV.2.2.3 - DETERMINAÇÃO DO ACÚMULO DO NÚMERO DE MOLES ADSORVIDO POR UNIDADE DE MASSA À CADA CICLO

O número de moles acumulado faz-se do somatório do número de moles adsorvido à cada ciclo.

IV.2.2.4 - DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO DA FRACÇÃO MOLAR À CADA CICLO E A FRACÇÃO MOLAR INICIAL

A relação entre as frações molares e o tempo de adsorção faz-se importante, pois caracteriza o comportamento da composição do gás após várias passagens pelo leito de carvão.

IV.2.2.5 - DETERMINAÇÃO DO ACÚMULO TOTAL ADSORVIDO

A soma total das frações molares após cada ciclo globaliza a quantidade adsorvida numa determinada massa de adsorvente.

IV.2.2.6 - DADOS EXPERIMENTAIS E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA

Os principais parâmetros da adsorção do gás dióxido de enxofre estão listados na tabela 6 e a sua configuração é mostrada nas figuras 21 à 28 e 29 à 36.

TABELA 6 - DADOS ENVOLVIDOS NA CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Dp (cm)	t _d (min)	y	y ₀ -y	vazão (cm ³ /s)	n ads (mol/s)	M _s (g)	t _{ads} (s)	n ads/M _s (mol/g*s)	(n* _t)ads/M _s (mol/g)	y/y ₀	Σy/y ₀
0,030	3,00	4,332E-03	0,000E+00	55,42	0,000E+00	13	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	1,5022
	3,96	4,043E-03	2,891E-04		1,639E-06		60	7,563E-06	7,563E-06	0,9333	
	6,60	1,894E-03	2,437E-03		1,382E-05		120	1,276E-04	1,351E-04	0,4373	
	16,70	5,701E-04	3,762E-03		2,133E-05		180	2,953E-04	4,304E-04	0,1316	
0,030	4,33	3,500E-03	0,000E+00	63,33	0,000E+00	13	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	1,6063
	4,62	3,164E-03	3,355E-04		2,174E-06		60	1,003E-05	1,003E-05	0,9041	
	7,02	1,742E-03	1,757E-03		1,139E-05		120	1,051E-04	1,151E-04	0,4979	
	14,02	7,148E-04	2,785E-03		1,004E-05		180	2,498E-04	3,650E-04	0,2043	
0,030	4,00	3,976E-03	0,000E+00	73,75	0,000E+00	13	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	1,1830
	4,66	3,123E-03	8,536E-04		6,440E-06		60	2,972E-05	2,972E-05	0,7853	
	9,72	1,137E-03	2,839E-03		2,142E-05		120	1,977E-04	2,274E-04	0,2860	
	20,45	4,440E-04	3,532E-03		2,665E-05		180	3,690E-04	5,964E-04	0,1117	
0,030	4,57	3,217E-03	0,000E+00	82,08	0,000E+00	13	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	1,4823
	4,96	2,843E-03	3,749E-04		3,148E-06		60	1,453E-05	1,453E-05	0,8835	
	8,36	1,382E-03	1,835E-03		1,541E-05		120	1,423E-04	1,568E-04	0,4296	
	17,40	5,446E-04	2,673E-03		2,244E-05		180	3,108E-04	4,675E-04	0,1693	
0,030	3,00	4,332E-03	0,000E+00	60,33	0,000E+00	20	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	1,8252
	4,05	3,896E-03	4,357E-04		2,689E-06		60	8,067E-06	8,067E-06	0,8994	
	5,25	2,614E-03	1,717E-03		1,060E-05		120	6,360E-05	7,167E-05	0,6035	
	11,06	9,645E-04	3,367E-03		2,078E-05		180	1,871E-04	2,587E-04	0,2226	
0,030	20,92	4,313E-04	3,900E-03	65,00	2,407E-05	20	240	2,889E-04	5,476E-04	0,0996	1,1999
	3,77	4,391E-03	0,000E+00		0,000E+00		0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,45	3,353E-03	1,038E-03		6,900E-06		60	2,070E-05	2,070E-05	0,7636	
	8,32	1,391E-03	3,000E-03		1,995E-05		120	1,197E-04	1,404E-04	0,3168	
0,030	17,93	5,244E-04	3,866E-03	75,33	2,571E-05	20	180	2,314E-04	3,717E-04	0,1194	1,4872
	3,82	4,293E-03	0,000E+00		0,000E+00		0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	3,95	4,060E-03	2,338E-04		1,802E-06		60	5,405E-06	5,405E-06	0,9456	
	7,10	1,690E-03	2,603E-03		2,006E-05		120	1,204E-04	1,258E-04	0,3937	
0,030	15,40	6,352E-04	3,658E-03	82,83	2,819E-05	20	180	2,537E-04	3,795E-04	0,1479	1,6571
	4,02	3,944E-03	0,000E+00		0,000E+00		0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,16	3,730E-03	2,134E-04		1,009E-06		60	5,426E-06	5,426E-06	0,9459	
	6,53	1,922E-03	2,022E-03		1,713E-05		120	1,020E-04	1,082E-04	0,4874	
0,030	11,86	8,820E-04	3,061E-03	48,33	2,594E-05	27	180	2,335E-04	3,417E-04	0,2238	1,9458
	3,65	4,642E-03	0,000E+00		0,000E+00		0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	3,84	4,256E-03	3,861E-04		1,909E-06		60	4,242E-06	4,242E-06	0,9168	
	4,05	2,939E-03	1,702E-03		8,418E-06		120	3,741E-05	4,166E-05	0,6332	
0,030	8,87	1,280E-03	3,362E-03	58,33	1,662E-05	27	180	1,108E-04	1,525E-04	0,2757	1,9219
	17,08	5,575E-04	4,084E-03		2,020E-05		240	1,795E-04	3,320E-04	0,1201	
	3,92	4,111E-03	0,000E+00		0,000E+00		0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,00	3,976E-03	1,351E-04		8,065E-07		60	1,792E-06	1,792E-06	0,9671	
0,030	5,60	2,382E-03	1,729E-03	58,33	1,032E-05	27	120	4,587E-05	4,766E-05	0,5794	1,9219
	10,30	1,056E-03	3,055E-03		1,823E-05		180	1,216E-04	1,692E-04	0,2568	
	19,00	4,873E-04	3,624E-03		2,163E-05		240	1,922E-04	3,615E-04	0,1105	

continua

0,030	3,97	4,026E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,05	3,896E-03	1,298E-04	65,83	6,742E-07	27	60	1,943E-06	1,943E-06	0,9678
	6,56	1,910E-03	2,116E-03		1,425E-05		120	6,333E-05	6,527E-05	0,4745
	12,35	8,367E-04	3,187E-03		2,146E-05		180	1,431E-04	2,084E-04	0,2003
0,030	3,88	4,182E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,00	3,976E-03	2,061E-04	76,33	1,610E-06	27	60	3,577E-06	3,577E-06	0,9507
	6,17	2,078E-03	2,104E-03		1,643E-05		120	7,302E-05	7,660E-05	0,4969
	13,95	7,193E-04	3,463E-03		2,704E-05		180	1,803E-04	2,569E-04	0,1720
0,030	4,02	3,944E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,25	3,605E-03	3,392E-04	80,33	2,787E-06	27	60	6,194E-06	6,194E-06	0,9140
	6,42	1,967E-03	1,976E-03		1,624E-05		120	7,219E-05	7,838E-05	0,4989
	14,37	6,930E-04	3,251E-03		2,672E-05		180	1,781E-04	2,565E-04	0,1757
0,023	3,43	5,184E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	3,50	4,999E-03	1,855E-04	59,67	1,132E-06	20	60	3,396E-06	3,396E-06	0,9642
	6,03	2,146E-03	3,038E-03		1,854E-05		120	1,113E-04	1,147E-04	0,4139
	11,97	8,725E-04	4,312E-03		2,632E-05		180	2,369E-04	3,515E-04	0,1683
0,023	4,05	3,896E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,17	3,716E-03	1,801E-04	65,83	1,213E-06	20	60	3,639E-06	3,639E-06	0,9538
	7,00	1,749E-03	2,147E-03		1,446E-05		120	8,676E-05	9,040E-05	0,4489
	14,57	6,810E-04	3,215E-03		2,165E-05		180	1,949E-04	2,853E-04	0,1748
0,023	3,98	4,009E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,12	3,789E-03	2,202E-04	75,00	1,689E-06	20	60	5,068E-06	5,068E-06	0,9451
	7,06	1,729E-03	2,280E-03		1,749E-05		120	1,050E-04	1,100E-04	0,4313
	15,75	6,174E-04	3,392E-03		2,602E-05		180	2,342E-04	3,442E-04	0,1540
0,023	4,00	3,976E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,27	3,578E-03	3,984E-04	81,67	3,329E-06	20	60	9,986E-06	9,986E-06	0,8990
	7,18	1,690E-03	2,286E-03		1,910E-05		120	1,146E-04	1,246E-04	0,4251
	13,83	7,272E-04	3,249E-03		2,714E-05		180	2,443E-04	3,689E-04	0,1829
0,023	4,00	3,976E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,25	3,645E-03	3,716E-04	58,00	2,285E-06	27	60	4,900E-06	4,900E-06	0,9065
	7,00	1,749E-03	2,227E-03		1,321E-05		120	5,873E-05	6,363E-05	0,4399
	15,07	6,527E-04	3,324E-03		1,972E-05		180	1,315E-04	1,951E-04	0,1642
0,023	4,33	3,500E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,40	3,413E-03	8,714E-05	65,83	5,869E-07	27	60	1,304E-06	1,304E-06	0,9751
	7,52	1,589E-03	1,910E-03		1,287E-05		120	5,719E-05	5,849E-05	0,4541
	14,67	6,752E-04	2,824E-03		1,902E-05		180	1,268E-04	1,853E-04	0,1929
0,023	4,15	3,745E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,58	3,207E-03	5,382E-04	73,67	4,056E-06	27	60	9,014E-06	9,014E-06	0,8563
	8,55	1,342E-03	2,403E-03		1,811E-05		120	8,047E-05	8,949E-05	0,3584
	17,23	5,514E-04	3,193E-03		2,407E-05		180	1,604E-04	2,499E-04	0,1472
0,023	4,20	3,673E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,68	3,102E-03	5,711E-04	81,67	4,771E-06	27	60	1,060E-05	1,060E-05	0,8445
	9,50	1,171E-03	2,502E-03		2,091E-05		120	9,291E-05	1,035E-04	0,3188
	16,62	5,770E-04	3,076E-03		2,587E-05		180	1,725E-04	2,760E-04	0,1571

continua

0,018	4,15	3,745E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,20	3,673E-03	7,141E-05		4,040E-07	60	1,868E-06	1,868E-06	0,9809	
	5,72	2,311E-03	1,424E-03	55,42	8,127E-06	13	7,502E-05	7,689E-05	0,6172	1,9983
	10,70	1,006E-03	2,739E-03		1,553E-05	100	2,150E-04	2,919E-04	0,2686	
	18,83	4,929E-04	3,252E-03		1,844E-05	240	3,404E-04	6,322E-04	0,1316	
0,018	4,15	3,745E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,48	3,318E-03	4,269E-04	65,00	2,839E-06	13	1,310E-05	1,310E-05	0,8860	1,6634
	6,06	2,131E-03	1,614E-03		1,073E-05	120	9,906E-05	1,122E-04	0,5691	
	13,08	7,801E-04	2,965E-03		1,971E-05	180	2,730E-04	3,851E-04	0,2083	
0,018	4,40	3,413E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,45	3,353E-03	5,971E-05	74,67	4,561E-07	13	2,105E-06	2,105E-06	0,9825	1,7254
	6,90	1,783E-03	1,629E-03		1,244E-05	120	1,149E-04	1,170E-04	0,5226	
	13,47	7,518E-04	2,661E-03		2,032E-05	180	2,014E-04	3,984E-04	0,2203	
0,018	4,23	3,632E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,73	3,053E-03	5,792E-04	83,00	4,918E-06	13	2,270E-05	2,270E-05	0,8405	1,5370
	6,93	1,773E-03	1,859E-03		1,578E-05	120	1,457E-04	1,684E-04	0,4882	
	13,40	7,567E-04	2,875E-03		2,441E-05	180	3,380E-04	5,064E-04	0,2084	
0,018	3,78	4,371E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	3,95	4,060E-03	3,111E-04		1,512E-06	60	4,535E-06	4,535E-06	0,9288	
	5,05	2,768E-03	1,603E-03	47,50	7,790E-06	20	4,674E-05	5,127E-05	0,6332	1,9588
	9,32	1,200E-03	3,170E-03		1,541E-05	100	1,387E-04	1,899E-04	0,2746	
	17,68	5,338E-04	3,837E-03		1,865E-05	240	2,237E-04	4,137E-04	0,1221	
0,018	3,67	4,598E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	3,85	4,237E-03	3,608E-04		1,956E-06	60	5,867E-06	5,867E-06	0,9215	
	4,78	3,004E-03	1,594E-03	53,00	8,640E-06	20	5,184E-05	5,771E-05	0,6534	1,9729
	8,83	1,287E-03	3,311E-03		1,795E-05	100	1,616E-04	2,193E-04	0,2799	
	17,45	5,426E-04	4,055E-03		2,199E-05	240	2,639E-04	4,831E-04	0,1180	
0,018	3,92	4,111E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	3,98	4,009E-03	1,022E-04	66,67	6,969E-07	20	2,091E-06	2,091E-06	0,9751	1,4867
	7,00	1,514E-03	2,597E-03		1,771E-05	120	1,063E-04	1,084E-04	0,3682	
	16,35	5,891E-04	3,522E-03		2,402E-05	180	2,162E-04	3,246E-04	0,1433	
0,018	4,30	3,538E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,42	3,388E-03	1,499E-04	73,67	1,130E-06	20	3,390E-06	3,390E-06	0,9576	1,5815
	7,60	1,567E-03	1,971E-03		1,486E-05	120	8,914E-05	9,253E-05	0,4429	
	15,30	6,404E-04	2,898E-03		2,184E-05	180	1,966E-04	2,891E-04	0,1810	
0,018	3,00	4,332E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	4,07	3,865E-03	4,669E-04	82,00	3,916E-06	20	1,175E-05	1,175E-05	0,8922	1,4458
	6,93	1,773E-03	2,559E-03		2,147E-05	120	1,288E-04	1,405E-04	0,4093	
	15,60	6,249E-04	3,707E-03		3,110E-05	180	2,799E-04	4,204E-04	0,1443	
0,018	3,67	4,598E-03	0,000E+00		0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	1,0000	
	3,88	4,182E-03	4,157E-04		2,055E-06	60	4,567E-06	4,567E-06	0,9096	
	5,30	2,579E-03	2,020E-03	48,33	9,986E-06	27	4,438E-05	4,895E-05	0,5608	1,7981
	9,93	1,107E-03	3,492E-03		1,726E-05	180	1,151E-04	1,640E-04	0,2406	
	22,18	4,004E-04	4,198E-03		2,076E-05	240	1,845E-04	3,485E-04	0,0871	

continua

	3.95	4.060E-03	0.000E+00		0.000E+00		0	0.000E+00	0.000E+00	1.0000	
0.010	4.00	3.976E-03	8.343E-05	60.33	5.150E-07	27	60	1.144E-06	1.144E-06	0.9794	1.7791
	5.67	2.340E-03	1.719E-03		1.061E-05		120	4.717E-05	4.831E-05	0.5765	
	11.62	9.059E-04	3.154E-03		1.947E-05		180	1.298E-04	1.781E-04	0.2231	
	3.62	4.709E-03	0.000E+00		0.000E+00		0	0.000E+00	0.000E+00	1.0000	
0.010	3.77	4.391E-03	3.187E-04	64.17	2.092E-06	27	60	4.649E-06	4.649E-06	0.9323	1.6374
	5.68	2.334E-03	2.375E-03		1.559E-05		120	6.928E-05	7.393E-05	0.4957	
	10.87	9.859E-04	3.723E-03		2.444E-05		180	1.629E-04	2.369E-04	0.2074	
	3.82	4.293E-03	0.000E+00		0.000E+00		0	0.000E+00	0.000E+00	1.0000	
0.010	4.03	3.928E-03	3.657E-04	75.00	2.806E-06	27	60	6.235E-06	6.235E-06	0.9148	1.4154
	7.65	1.553E-03	2.740E-03		2.102E-05		120	9.344E-05	9.967E-05	0.3618	
	16.20	5.959E-04	3.698E-03		2.837E-05		180	1.891E-04	2.888E-04	0.1388	
	4.17	3.716E-03	0.000E+00		0.000E+00		0	0.000E+00	0.000E+00	1.0000	
0.010	4.56	3.228E-03	4.877E-04	78.33	3.908E-06	27	60	8.684E-06	8.684E-06	0.8688	1.5245
	6.95	1.766E-03	1.950E-03		1.563E-05		120	6.945E-05	7.813E-05	0.4753	
	14.75	6.706E-04	3.045E-03		2.440E-05		180	1.627E-04	2.408E-04	0.1805	

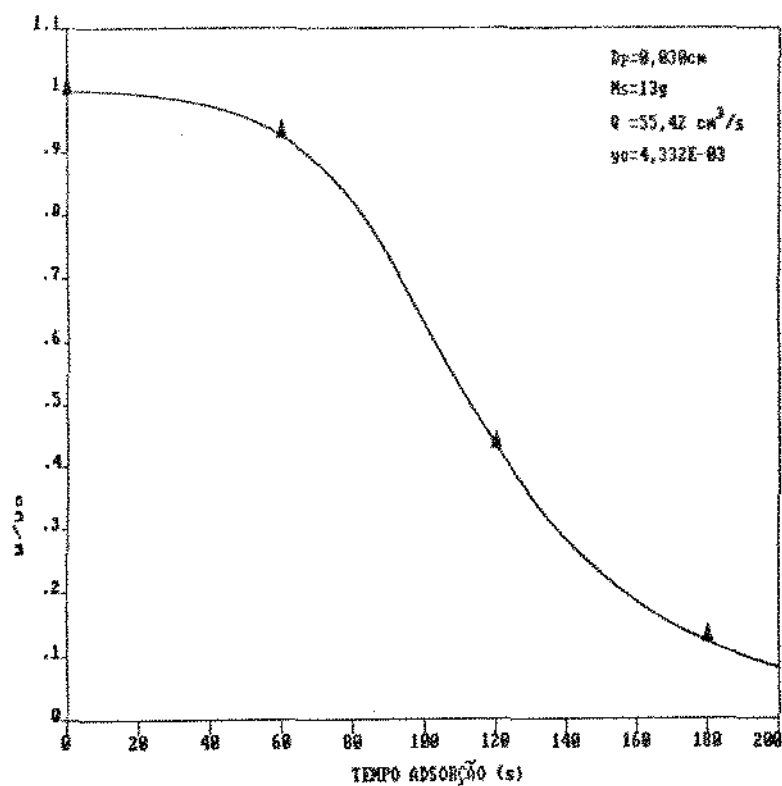


FIGURA 21: REDUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

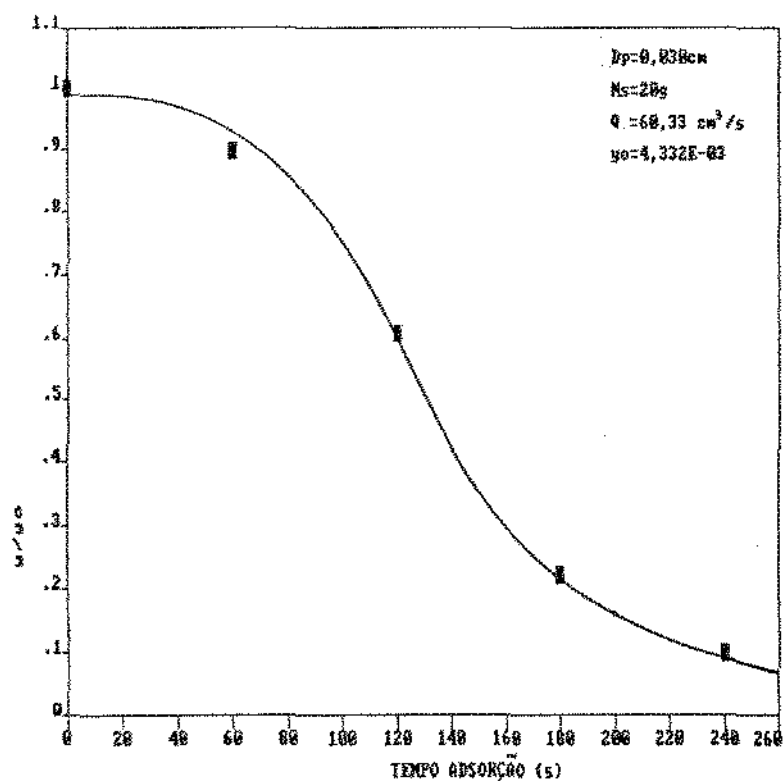


FIGURA 22: REDUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

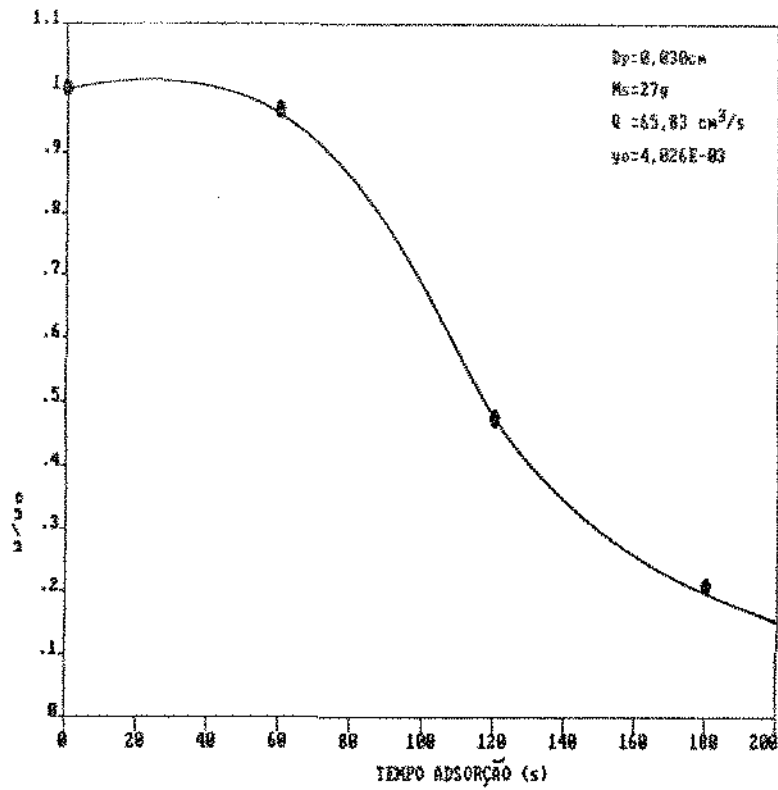


FIGURA 23: REDUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

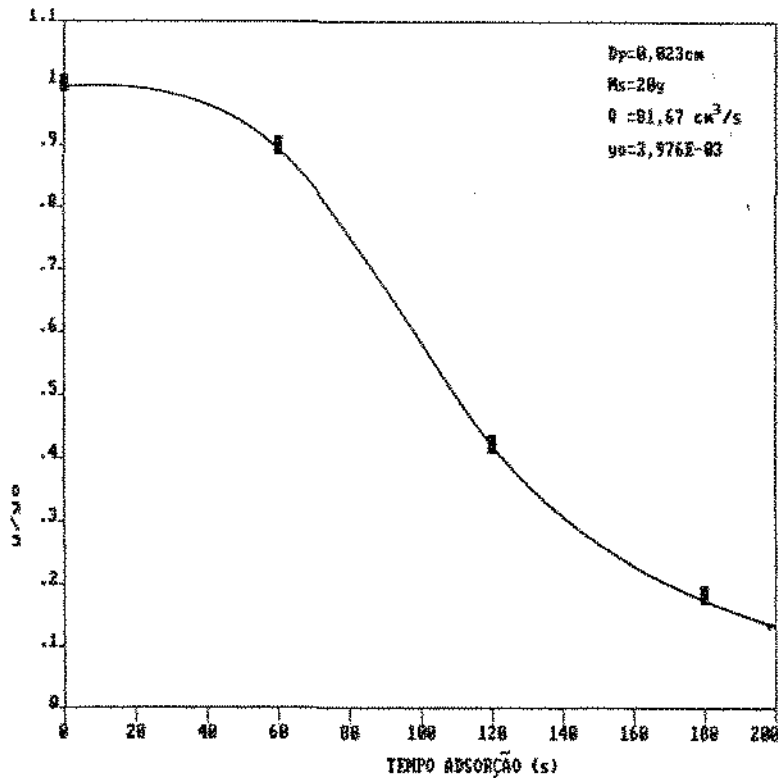


FIGURA 24: REDUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

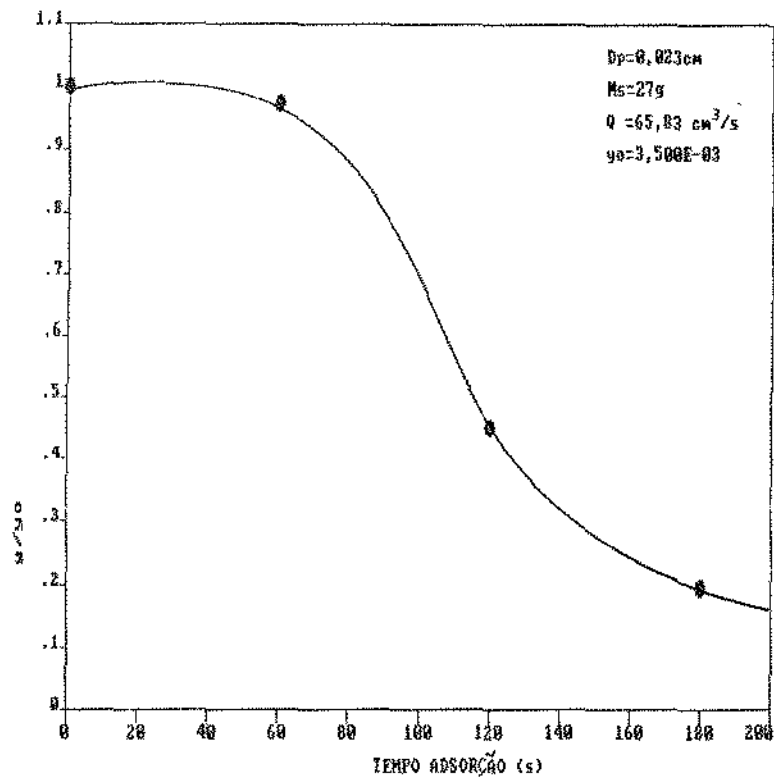


FIGURA 25: REDUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

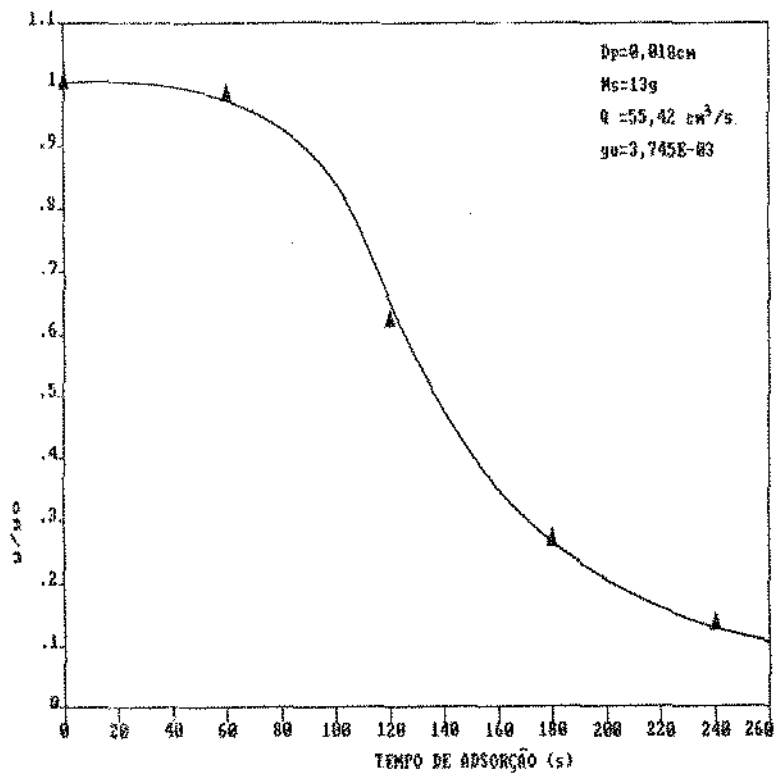


FIGURA 26: REDUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

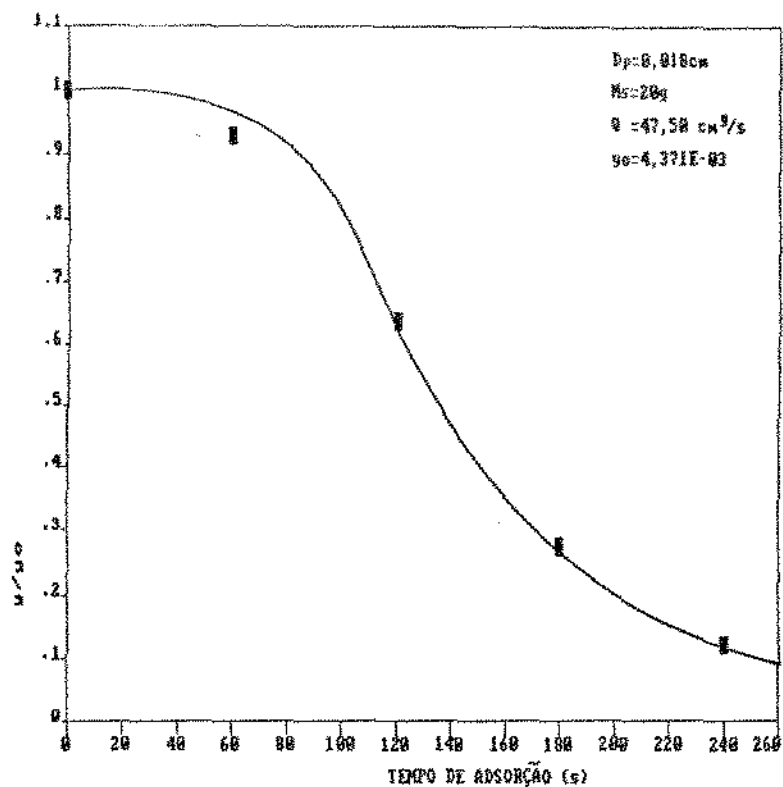


FIGURA 27: REDUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

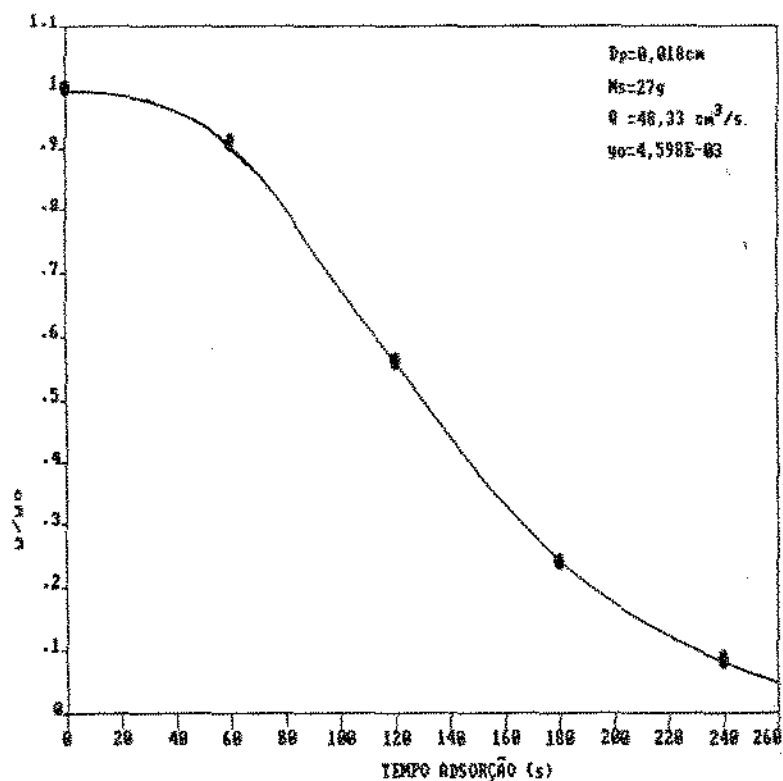


FIGURA 28: REDUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 NA SAÍDA DO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

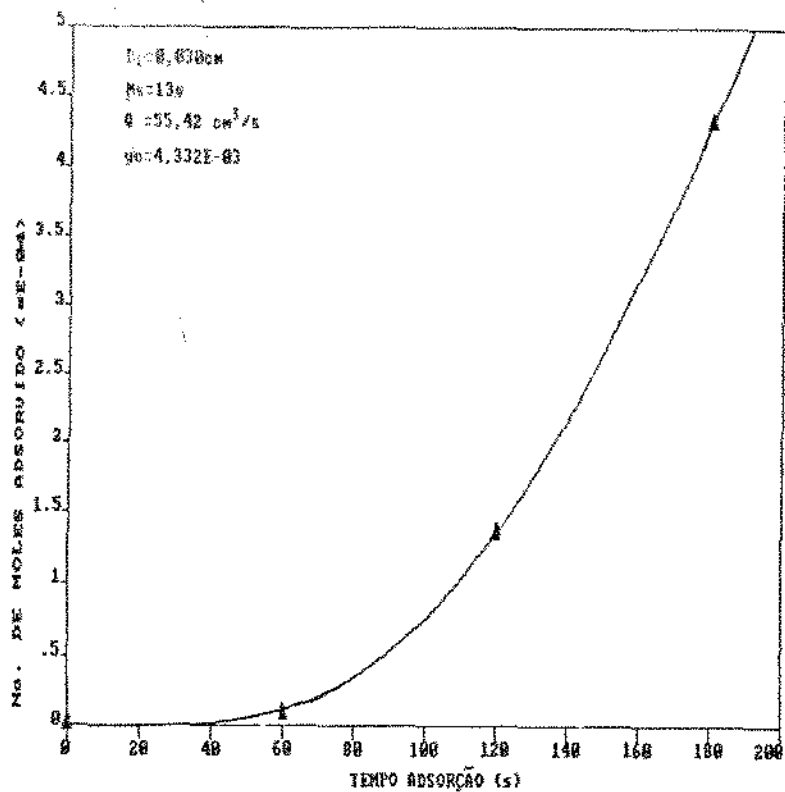


FIGURA 29: AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 ADSORVIDO NO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

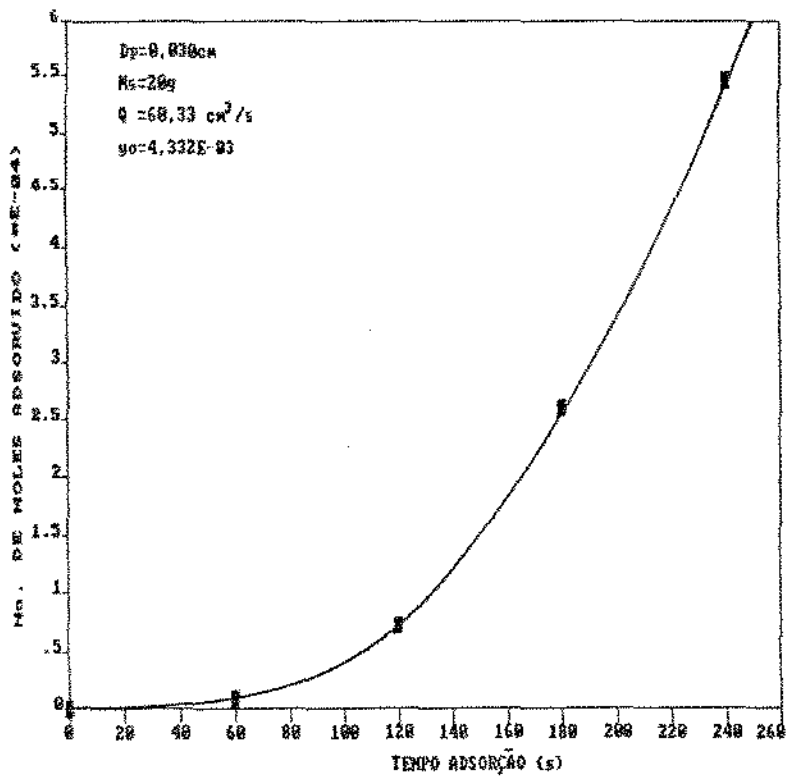


FIGURA 30: AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 ADSORVIDO NO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

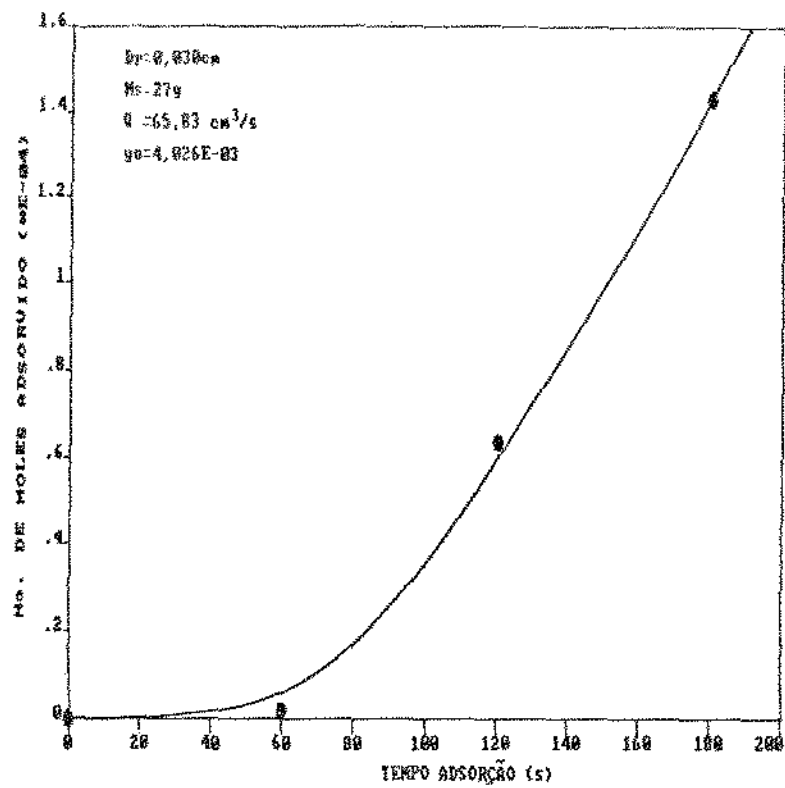


FIGURA 31: AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 ADSORVIDO NO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

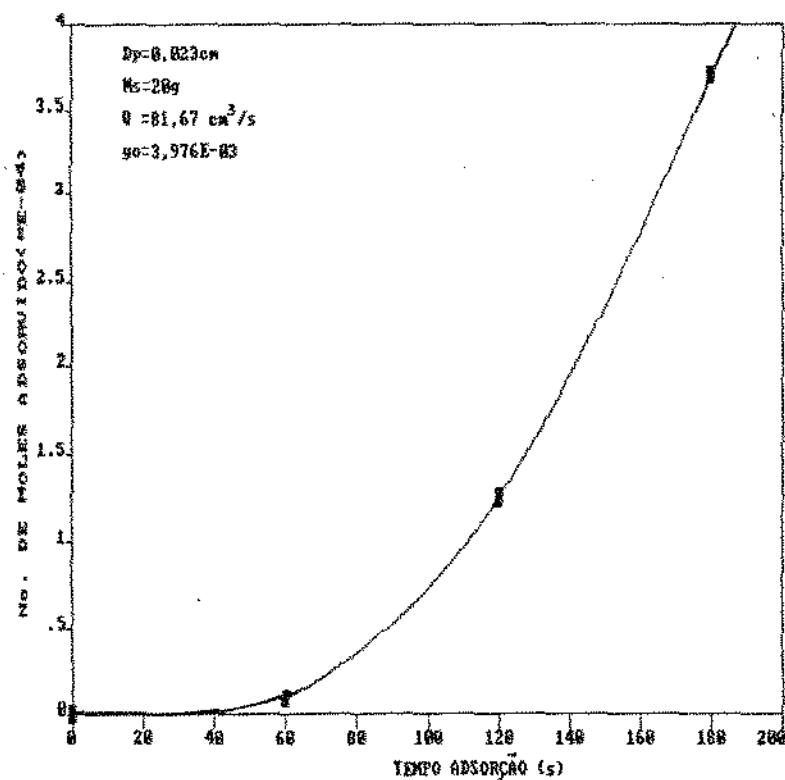


FIGURA 32: AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 ADSORVIDO NO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

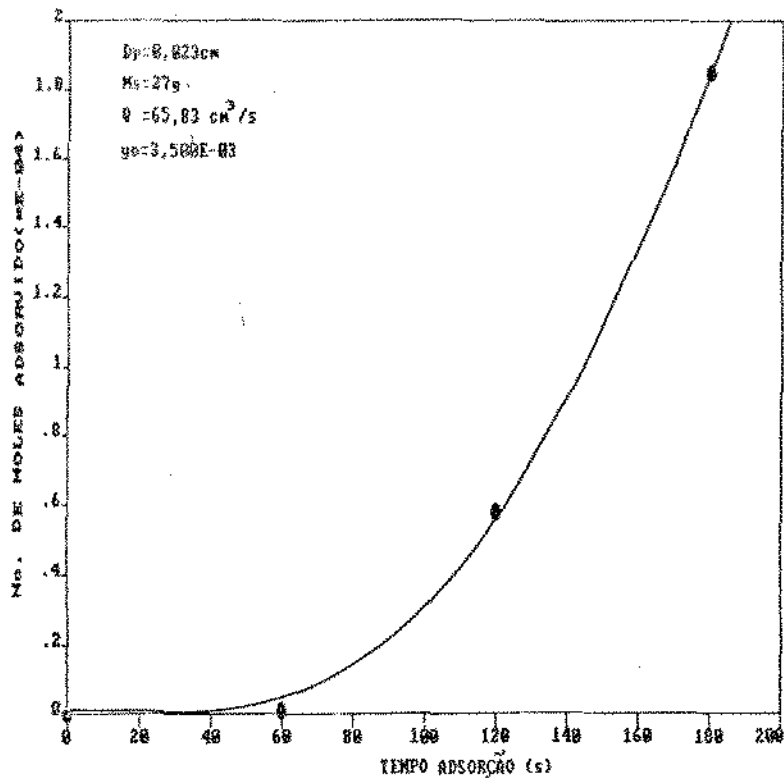


FIGURA 33: AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 ADSORVIDO NO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

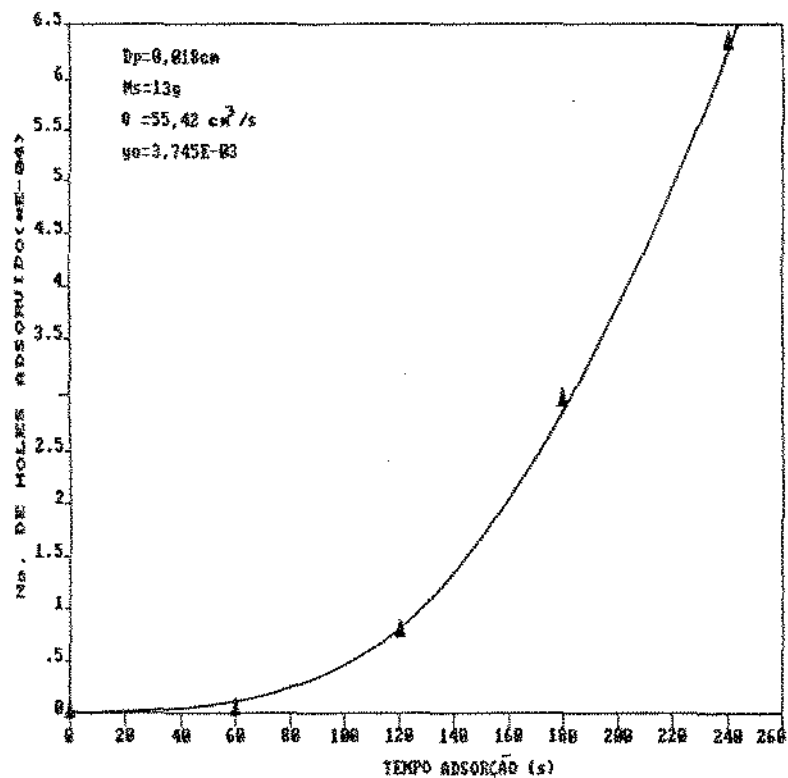


FIGURA 34: AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 ADSORVIDO NO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

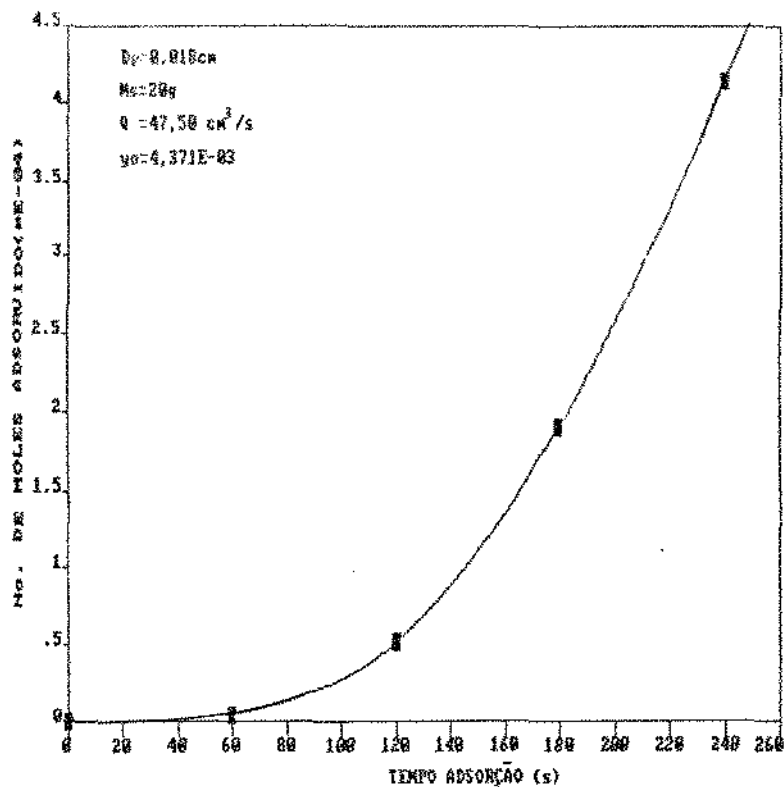


FIGURA 35: AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 ADSORVIDO NO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

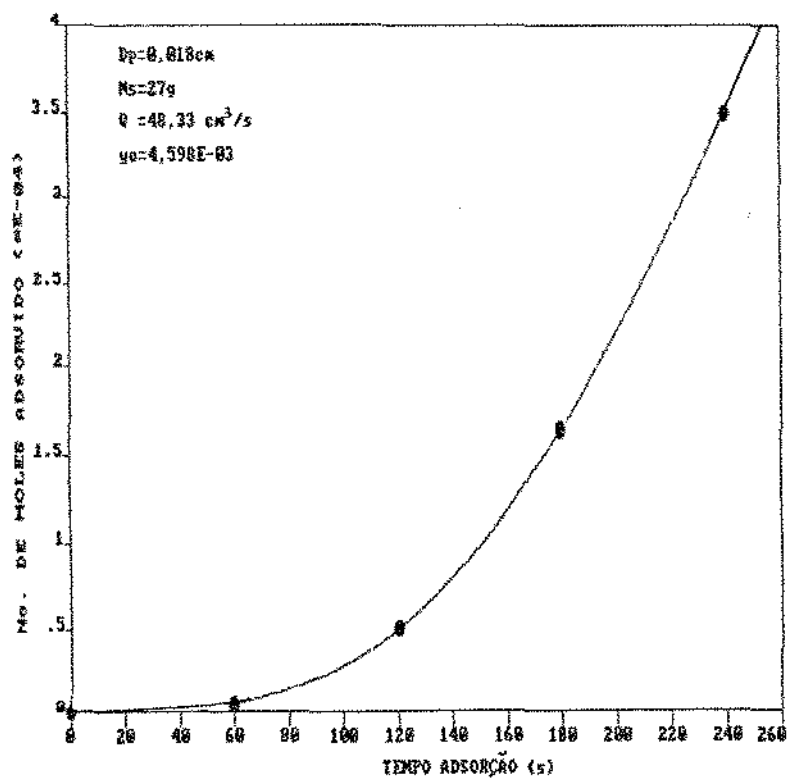


FIGURA 36: AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DO SO_2 ADSORVIDO NO LEITO FLUIDIZADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ADSORÇÃO

IV.2.2.7- DETERMINAÇÃO DOS DADOS CINÉTICOS

Foram feitas numerosas tentativas no sentido de desenvolver expressões matemáticas a partir do mecanismo de adsorção que se adaptassem a realidade experimental.

As teorias usadas com mais frequências são as de Langmuir, Freundlich e Brunauer, Emmett e Teller (BET).

Ruthven(45) apresenta uma revisão bibliográfica destas teorias, bem como o tratamento para os dados de equilíbrio. Mostra que o modelo clássico de Langmuir é, ainda, muito utilizado. Logicamente, que o modelo possui algumas restrições como: adsorção monomolecular, adsorção localizada e a adsorção independente da superfície sólida.

Partindo, então, do modelo de Langmuir para as análises subsequentes, obtemos a seguinte equação:

$$Y = a + b \cdot y_{SO_2} \quad (5)$$

onde:

Y = número de moles adsorvido por unidade de massa de adsorvente

y_{SO_2} = fração molar do gás adsorvido

a e b = parâmetros dependentes de cada adsorvente/adsorbato, à cada temperatura.

A equação(5), no entanto, possui uma restrição física. Quando $y_{SO_2} = 0$, logo $Y = a$, mas como Y é uma função direta da quantidade adsorvida, podemos afirmar, que para a forma apresentada acima deve ser nula.

Uma análise dos resultados encontrados no trabalho de Fraser(7) para adsorção em leitos fluidizados, relacionando-o com a proposta acima obtemos as figuras 37 à 41.

A tabela 7 apresenta valores de "b" para as temperaturas de 28° e 65°C na adsorção com pontos de diferentes naturezas e contaminantes do SO₂.

TABELA 7 - PARÂMETROS DA CINÉTICA DE ADSORÇÃO NO EQUILÍBRIO

SISTEMA ADSORVENTE/ADSORBATO	ÁREA ESPE- CÍFICA (m ² /g)	FAIXA DE ySO ₂ (*10 ⁴)	b (*10 ⁶) (mol/g)
GRAFITE / (SO ₂ +CO)	9,6	20 a 122	3,199
GRAFITE / (SO ₂ +CO)	9,6	1,85 a 106	28,03
ZEÓLITO / (SO ₂ +CO ₂)	100	8 a 120	10,49
ZEÓLITO / (SO ₂ +CO)	100	0,21 a 35	44,62
CARVÃO ATIVADO/(SO ₂ +CO)	930	0,84 a 14,3	260,0

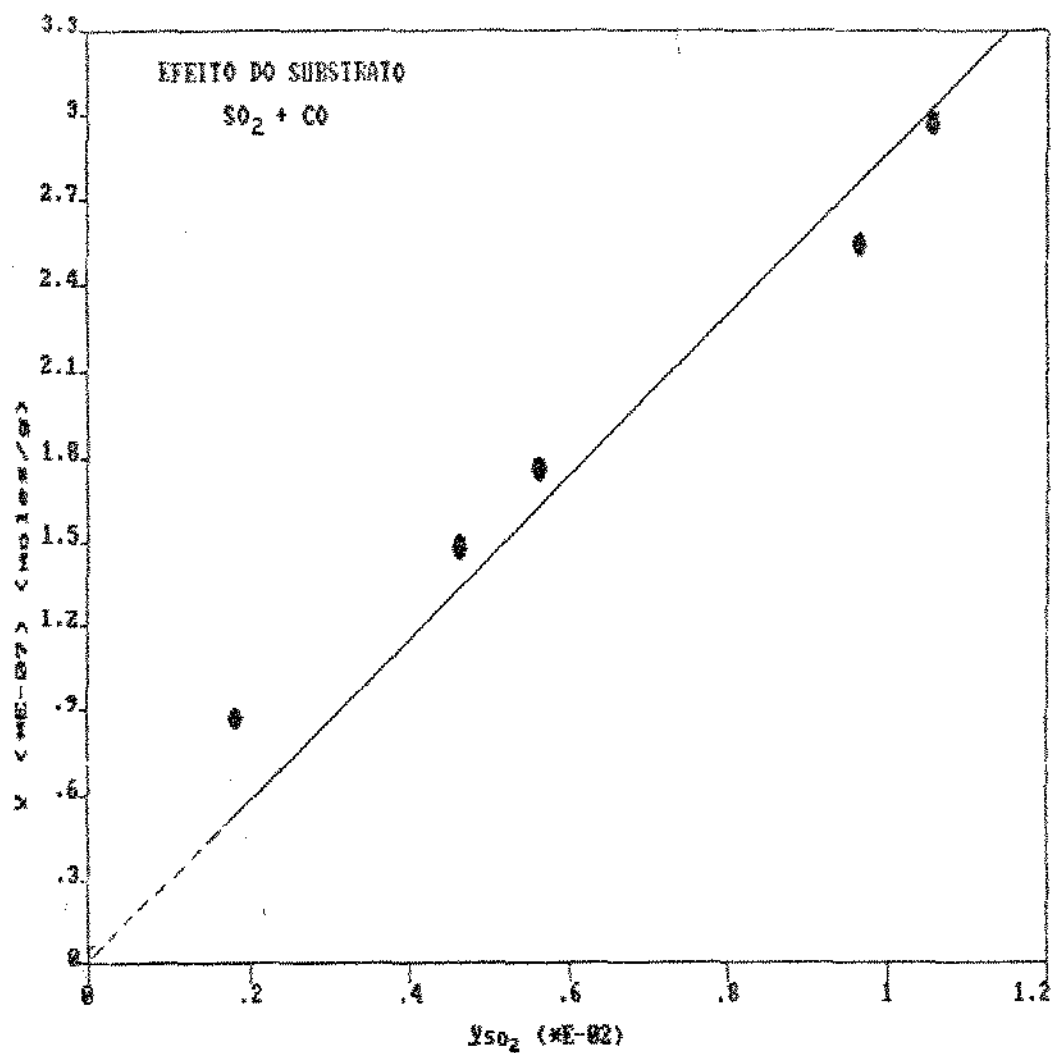


FIGURA 37: ANÁLISE DE DADOS CINÉTICOS DO SO_2 NO EQUILÍBRIO COM ADSORÇÃO EM GRAFITE A 28°C

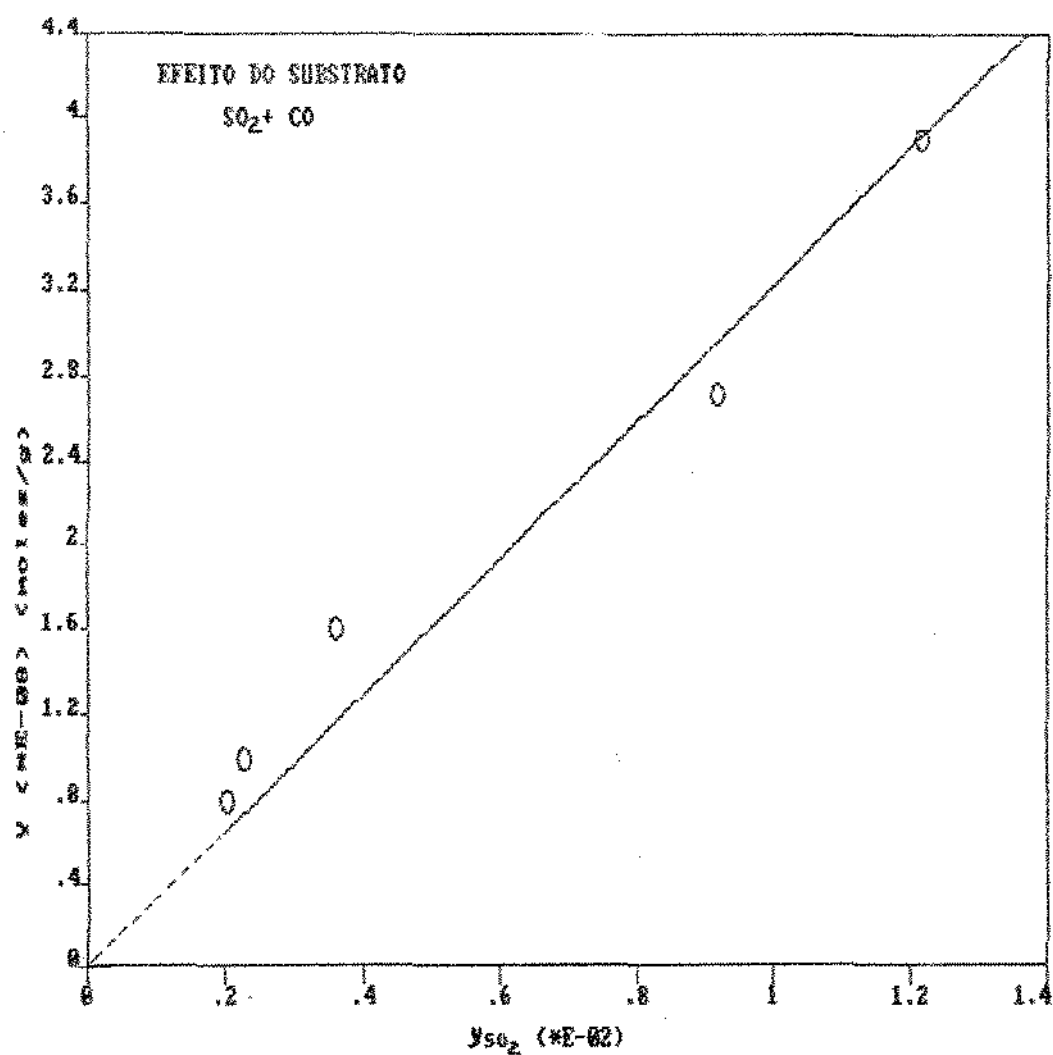


FIGURA 38: ANÁLISE DE DADOS CINÉTICOS DO SO₂ NO
EQUILÍBRIO COM ADSORÇÃO EM GRAFITE A
65°C

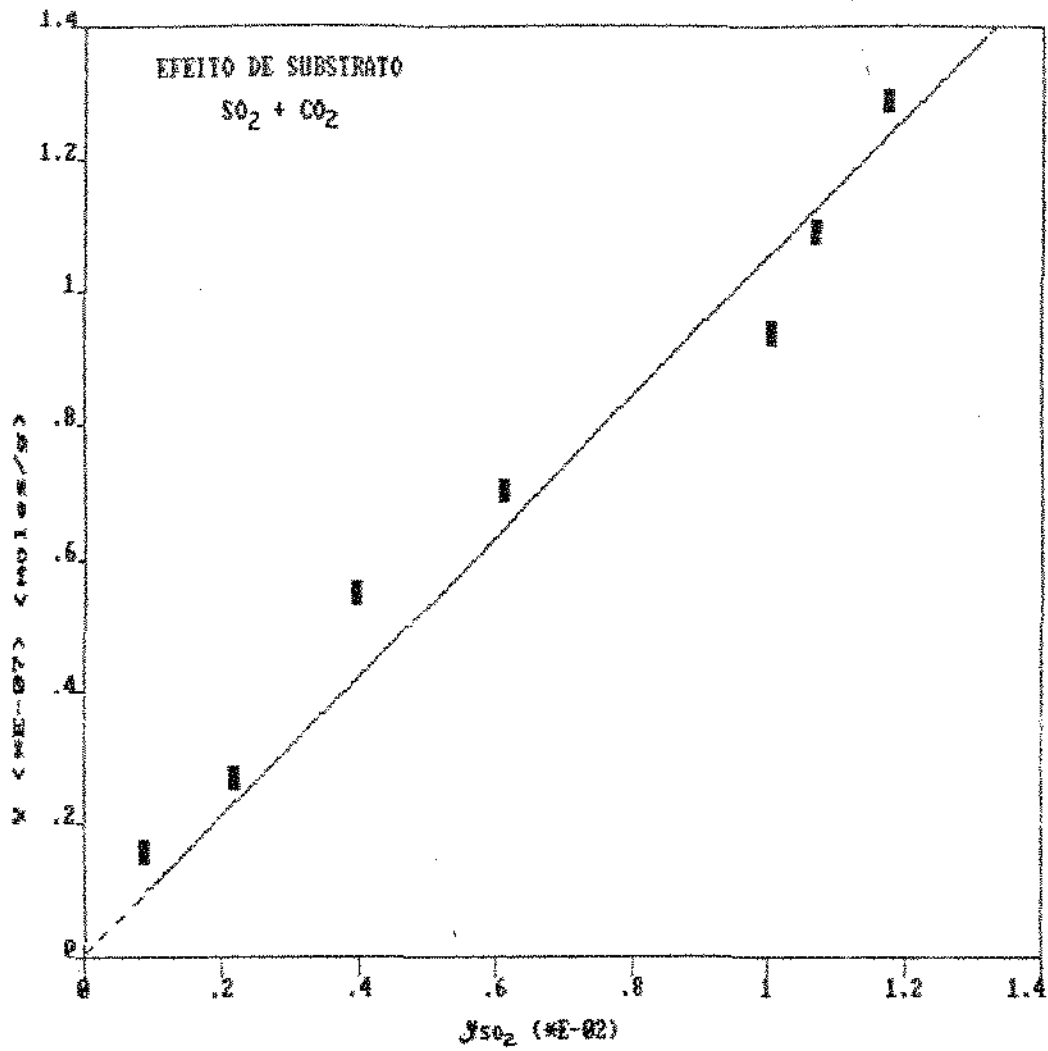


FIGURA 39: ANÁLISE DE DADOS CINÉTICOS DO SO_2 NO EQUILÍBRIO COM ADSORÇÃO EM ZEÓLITO A 65°C

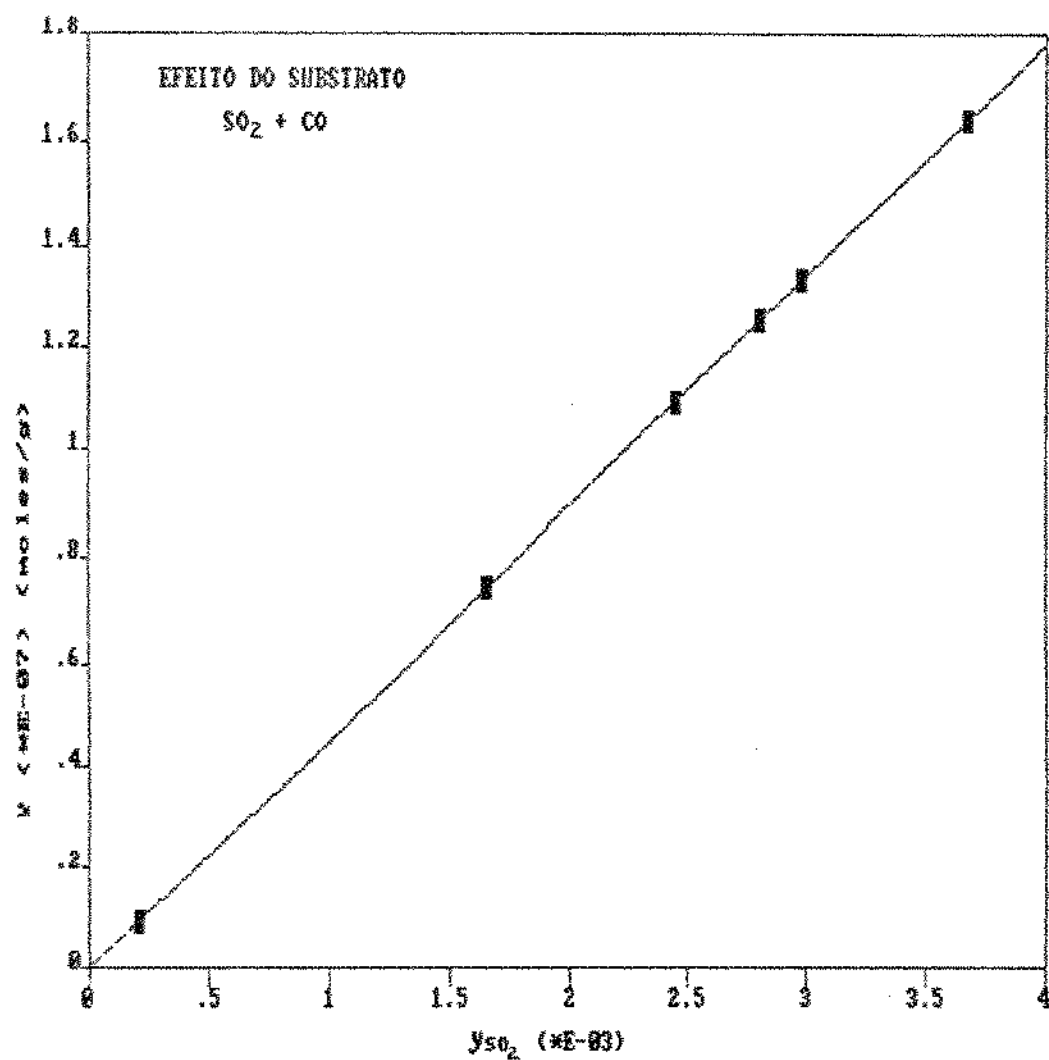


FIGURA 40: ANÁLISE DE DADOS CINÉTICOS DO SO₂ NO EQUILÍBRIO COM ADSORÇÃO EM ZEÓLITO A 65°C

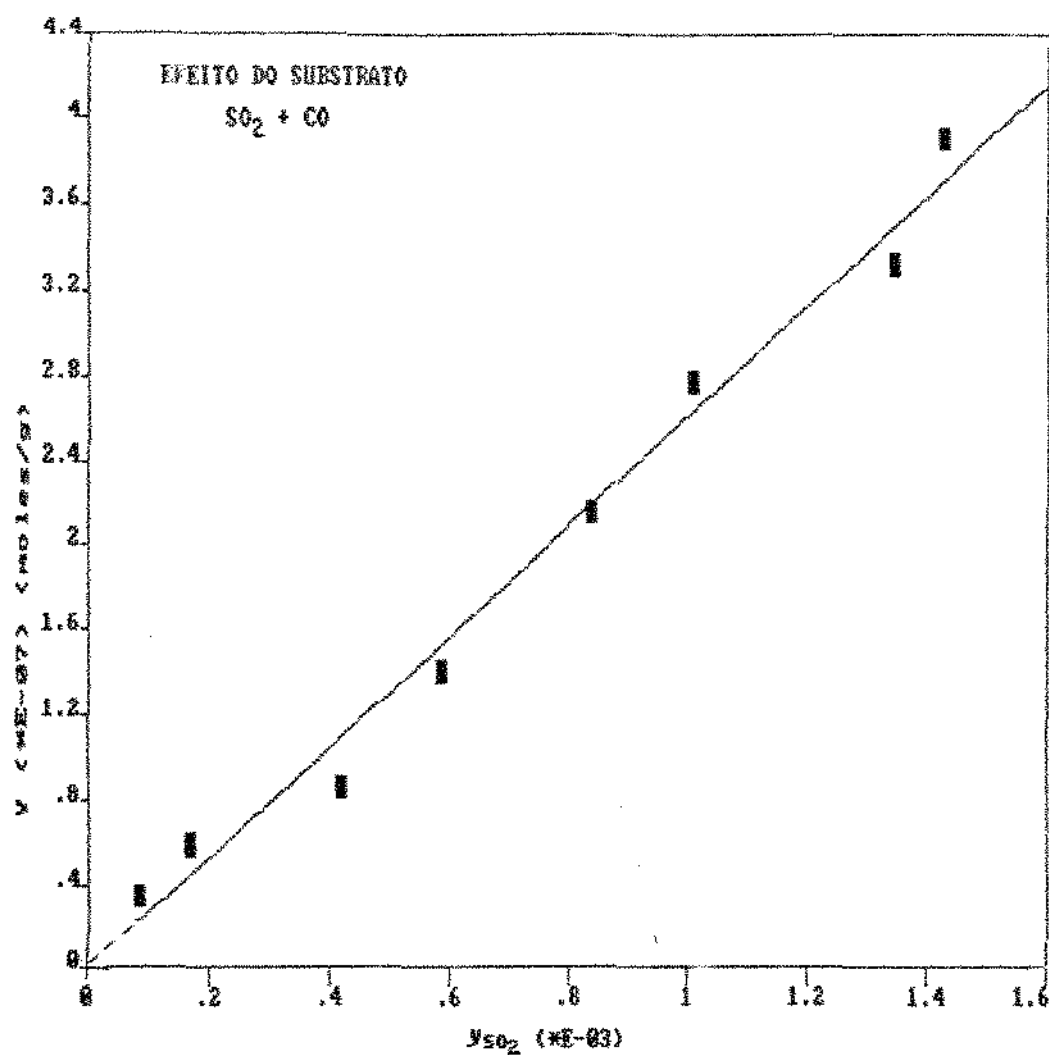


FIGURA 41: ANÁLISE DE DADOS CINÉTICOS DO SO_2 NO
EQUILÍBRIO COM ADSORÇÃO EM CARVÃO
ATIVADO À 28°C

IV.2.2.8 - DETERMINAÇÃO DE DADOS CINÉTICOS PARA UM CICLO FECHADO DE ADSORÇÃO

Seguindo a linha de idéias expressa no trabalho realizado por Richardson e Bakhtiar(6), a relação entre a concentração de saída e o tempo será obtida para isotermas de adsorção num leito fluidizado, no qual os sólidos são misturados em bateladas e o gás parte do sistema em diferentes concentrações, após várias passagens pelo sólido. Para simplificar, uma consideração será dada para o sistema, que a isoterma de adsorção seja linear.

Para um tempo de contato t_c , quando a concentração do gás é y , a taxa de remoção da corrente total será igual a taxa de adsorção do sólido mais a taxa de acumulação do gás presente na coluna.

Então, obtêm-se o seguinte balanço de massa da coluna de fluidização:

$$G_m(y_0 - y) = \frac{d}{dt} (M_s Y + c M_s y) \quad (6)$$

onde:

G_m = vazão molar do gás

y_0 = fração molar inicial do gás

y = fração molar do gás após o leito à cada ciclo

M_s = massa do sólido do leito

Y = número de moles do gás adsorvido por unidade de massa do sólido

c = número de moles do gás presente no leito por unidade de massa do sólido

Assumindo que a isoterma possa ser representada pela equação 5, definida no item IV.2.2.7,

$$Y = a + b \cdot y_{SO_2} \quad (5)$$

e substituindo a equação (5) em (6) temos:

$$Gm \cdot (y_0 - y) = \frac{d}{dt} (Ms \cdot (a + b \cdot y_{SO_2})) + c \cdot Ms \cdot y \quad (7)$$

onde c e b representam a capacidade do ar e do sólido em reter o gás, e sendo b muito maior que c , então o último termo é desprezível e com tratamento proposto, torna-se:

$$Gm \cdot (y_0 - y) = b \cdot Ms \cdot \frac{dy}{dt} \quad (8)$$

Agora, se t_c é o tempo de contato gás-sólido e y_1 é a fração molar respectivo ao 1º ciclo, integra-se da seguinte maneira:

$$\int_0^{y_1} \frac{dy}{(y_0 - y)} = \int_0^{t_c} \frac{Gm}{Ms \cdot b} dt \quad (9)$$

onde:

$$t_c = \frac{(Ms / P_s)}{\epsilon \cdot Q} \quad (10)$$

ϵ = porosidade do leito fluidizado

Q = vazão volumétrica do sistema

$$\frac{y_1}{y_0} = 1 - e^{-(Gm \cdot t_c / Ms \cdot b)} \quad (11)$$

A equação 11 corresponde ao 1º ciclo de contato gás-sólido.

Para um 2º ciclo de mesma duração t_c , têm-se:

$$\frac{y_2}{y_0} = 1 - e^{-(Gm \cdot t_c / Ms \cdot b)} \quad (12)$$

A generalização para N ciclos, pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{y}{y_0} = N * \left[1 - e^{-(Gm \cdot t_c / Ms \cdot b)} \right] \quad (13)$$

Rearranjando, têm-se:

$$\ln \left[\frac{1 - \frac{1}{N} \left[\frac{y}{y_0} \right]}{1} \right] = - \frac{1}{b} * \left[\frac{t_c \cdot Gm}{Ms} \right] \quad (14)$$

A equação 14 é uma forma simplificada para análise da concentração de gases na saída do leito em função do tempo para N ciclos, dado por:

$$N = \frac{T}{(V/Q)} \quad (15)$$

onde:

T= tempo total do experimento

V= volume total do equipamento

Através da equação 14 pode-se analisar o comportamento da fração molar do gás(y) na saída do leito em função das vazões volumétrica e molar e da massa do adsorvente no leito.

IV.2.2.9 - DADOS EXPERIMENTAIS E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA

A tabela 8 lista os dados experimentais relativos a cinética de adsorção num ciclo fechado obtidos neste trabalho.

As figuras 42 à 44 mostram os resultados finais e conclusivos do trabalho proposto, onde a intersecção $-1/b$ determina a relação adsorvente/adsorbato característico do sistema.

Os valores encontrados de b , pela inclinação da reta, foram $1,422 \times 10^{-4}$, $1,367 \times 10^{-4}$, $1,300 \times 10^{-4}$.

Estatisticamente, pode-se dizer dos valores médios do desvio padrão encontrado no ajuste dos pontos experimentais respectivos a cada diâmetro de partícula, são da ordem de $9,0 \times 10^{-3}$.

TABELA 8 - DADOS RELATIVOS A CINÉTICA DE ADSORÇÃO NUM CICLO FECHADO

D_p (cm)	M_s (g)	ρ_s (g/cm ³)	L (cm)	ϵ	Q (cm ³ /s)	G_m (g/s)	t_c (s)	y_0	y_n	T (s)	N	$1/N$	$G_{m,c}/M_s$ (mol/g)	$\frac{x y}{y_0}$	$\ln \left[\frac{1 - \frac{1}{N} \left(\frac{y}{y_0} \right)}{N} \right]$
0,030	13,0	1,1307	2,10	0,7963	55,42	8,55E-02	2,61E-01	4,332E-03	5,700E-04	180,0	2,85	0,35	1,713E-03	1,5022	-0,749
	13,0	1,1307	2,20	0,8056	63,33	9,77E-02	2,25E-01	3,500E-03	7,150E-04	180,0	3,26	0,31	1,693E-03	1,6063	-0,680
	13,0	1,1307	2,20	0,8056	73,75	1,14E-01	1,94E-01	3,976E-03	4,440E-04	180,0	3,79	0,26	1,693E-03	1,1830	-0,374
	13,0	1,1307	2,30	0,8140	82,08	1,27E-01	1,72E-01	3,217E-03	5,450E-04	180,0	4,22	0,24	1,676E-03	1,4023	-0,433
0,030	20,0	1,1307	3,20	0,7943	60,33	9,31E-02	3,69E-01	4,332E-03	4,310E-04	240,0	4,14	0,24	1,717E-03	1,8252	-0,502
	20,0	1,1307	3,30	0,8006	65,00	1,00E-01	3,40E-01	4,391E-03	5,240E-04	180,0	3,34	0,30	1,704E-03	1,1999	-0,445
	20,0	1,1307	3,40	0,8064	75,33	1,16E-01	2,91E-01	4,293E-03	6,350E-04	180,0	3,87	0,26	1,692E-03	1,4872	-0,484
	20,0	1,1307	3,50	0,8120	82,83	1,28E-01	2,63E-01	3,944E-03	8,830E-04	180,0	4,26	0,23	1,680E-03	1,6571	-0,493
0,030	27,0	1,1307	4,25	0,7910	48,33	7,46E-02	6,25E-01	4,642E-03	5,580E-04	240,0	3,31	0,30	1,725E-03	1,9458	-0,885
	27,0	1,1307	4,30	0,7934	50,33	9,00E-02	5,16E-01	4,111E-03	4,870E-04	240,0	4,00	0,25	1,719E-03	1,9219	-0,655
	27,0	1,1307	4,40	0,7981	65,83	1,02E-01	4,54E-01	4,026E-03	8,390E-04	180,0	3,39	0,30	1,709E-03	1,6506	-0,668
	27,0	1,1307	4,50	0,8026	76,33	1,10E-01	3,90E-01	4,182E-03	7,190E-04	180,0	3,93	0,25	1,700E-03	1,6196	-0,532
	27,0	1,1307	4,60	0,8069	80,33	1,24E-01	3,68E-01	3,944E-03	6,930E-04	180,0	4,13	0,24	1,691E-03	1,5886	-0,485
0,023	20,0	1,1752	3,55	0,8216	59,67	9,20E-02	3,47E-01	5,184E-03	8,730E-04	180,0	3,07	0,33	1,597E-03	1,5465	-0,701
	20,0	1,1752	3,70	0,8289	65,83	1,02E-01	3,12E-01	3,896E-03	6,810E-04	180,0	3,39	0,30	1,584E-03	1,5775	-0,627
	20,0	1,1752	3,80	0,8334	75,00	1,16E-01	2,72E-01	4,009E-03	6,170E-04	180,0	3,86	0,26	1,575E-03	1,5384	-0,505
	20,0	1,1752	3,90	0,8376	81,67	1,26E-01	2,49E-01	3,976E-03	7,270E-04	180,0	4,20	0,24	1,567E-03	1,5078	-0,445
0,023	27,0	1,1752	4,60	0,8142	58,00	8,95E-02	4,87E-01	3,976E-03	6,530E-04	180,0	2,98	0,34	1,612E-03	1,5106	-0,706
	27,0	1,1752	5,10	0,8324	65,83	1,02E-01	4,19E-01	3,500E-03	6,750E-04	180,0	3,39	0,30	1,577E-03	1,6221	-0,652
	27,0	1,1752	5,15	0,8340	73,67	1,14E-01	3,74E-01	3,745E-03	5,510E-04	180,0	3,79	0,26	1,574E-03	1,3619	-0,445
	27,0	1,1752	5,25	0,8372	81,67	1,26E-01	3,36E-01	3,673E-03	5,770E-04	180,0	4,20	0,24	1,568E-03	1,3204	-0,377
0,018	13,0	1,2436	2,70	0,8560	55,42	8,55E-02	2,20E-01	3,745E-03	4,930E-04	240,0	3,80	0,26	1,449E-03	1,9903	-0,746
	13,0	1,2436	2,80	0,8611	65,00	1,00E-01	1,87E-01	3,745E-03	7,800E-04	180,0	3,34	0,30	1,440E-03	1,6634	-0,688
	13,0	1,2436	2,85	0,8635	74,67	1,15E-01	1,62E-01	3,413E-03	7,520E-04	180,0	3,84	0,26	1,436E-03	4,7254	-0,597
	13,0	1,2436	3,00	0,8704	83,00	1,20E-01	1,45E-01	3,632E-03	7,570E-04	180,0	4,27	0,23	1,425E-03	1,5370	-0,446
0,018	20,0	1,2436	3,80	0,8425	47,50	7,33E-02	4,02E-01	4,371E-03	5,340E-04	240,0	3,26	0,31	1,472E-03	1,9588	-0,920
	20,0	1,2436	3,85	0,8446	53,00	8,18E-02	3,59E-01	4,590E-03	5,430E-04	240,0	3,63	0,28	1,469E-03	1,9728	-0,783
	20,0	1,2436	4,00	0,8504	66,67	1,03E-01	2,84E-01	4,111E-03	5,890E-04	180,0	3,43	0,29	1,459E-03	1,4867	-0,568
	20,0	1,2436	4,20	0,8575	73,67	1,14E-01	2,55E-01	3,538E-03	6,400E-04	180,0	3,79	0,26	1,446E-03	1,5815	-0,540
	20,0	1,2436	4,35	0,8624	82,00	1,26E-01	2,27E-01	4,332E-03	6,250E-04	180,0	4,22	0,24	1,438E-03	1,4458	-0,420
0,018	27,0	1,2436	5,20	0,8447	48,33	7,46E-02	5,32E-01	4,598E-03	4,000E-04	240,0	3,31	0,30	1,468E-03	1,7781	-0,782
	27,0	1,2436	5,50	0,8531	60,33	9,31E-02	4,22E-01	4,060E-03	9,060E-04	180,0	3,10	0,32	1,454E-03	1,7791	-0,852
	27,0	1,2436	5,60	0,8558	64,17	9,90E-02	3,95E-01	4,709E-03	9,060E-04	180,0	3,30	0,30	1,449E-03	1,6374	-0,686
	27,0	1,2436	5,80	0,8607	75,00	1,16E-01	3,36E-01	4,293E-03	5,960E-04	180,0	3,86	0,26	1,441E-03	1,4154	-0,457
	27,0	1,2436	5,85	0,8619	78,33	1,21E-01	3,22E-01	3,716E-03	6,710E-04	180,0	4,03	0,25	1,439E-03	1,5245	-0,475

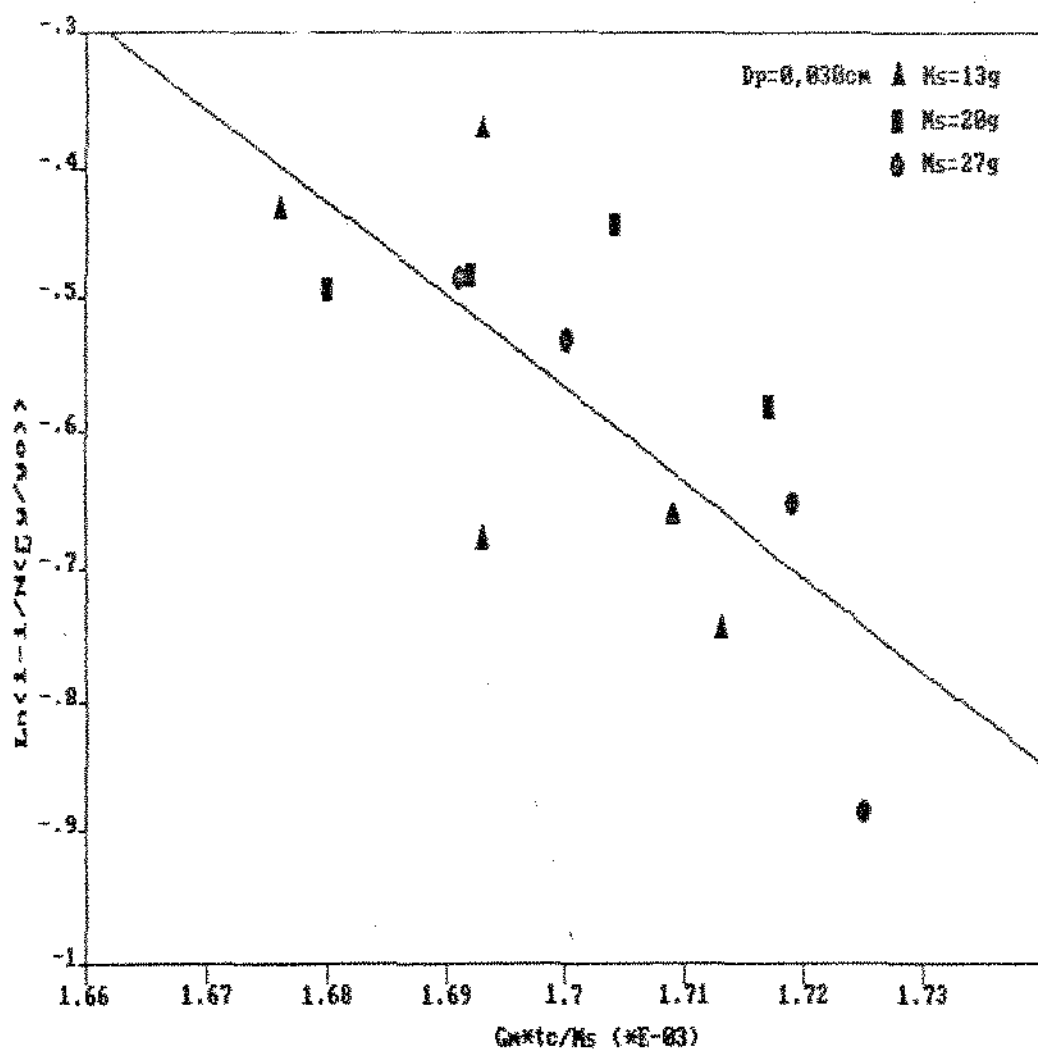


FIGURA 42: ANÁLISE DE DADOS CINÉTICOS DO SO_2 NUM CICLO FECHADO COM ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO À 25°C

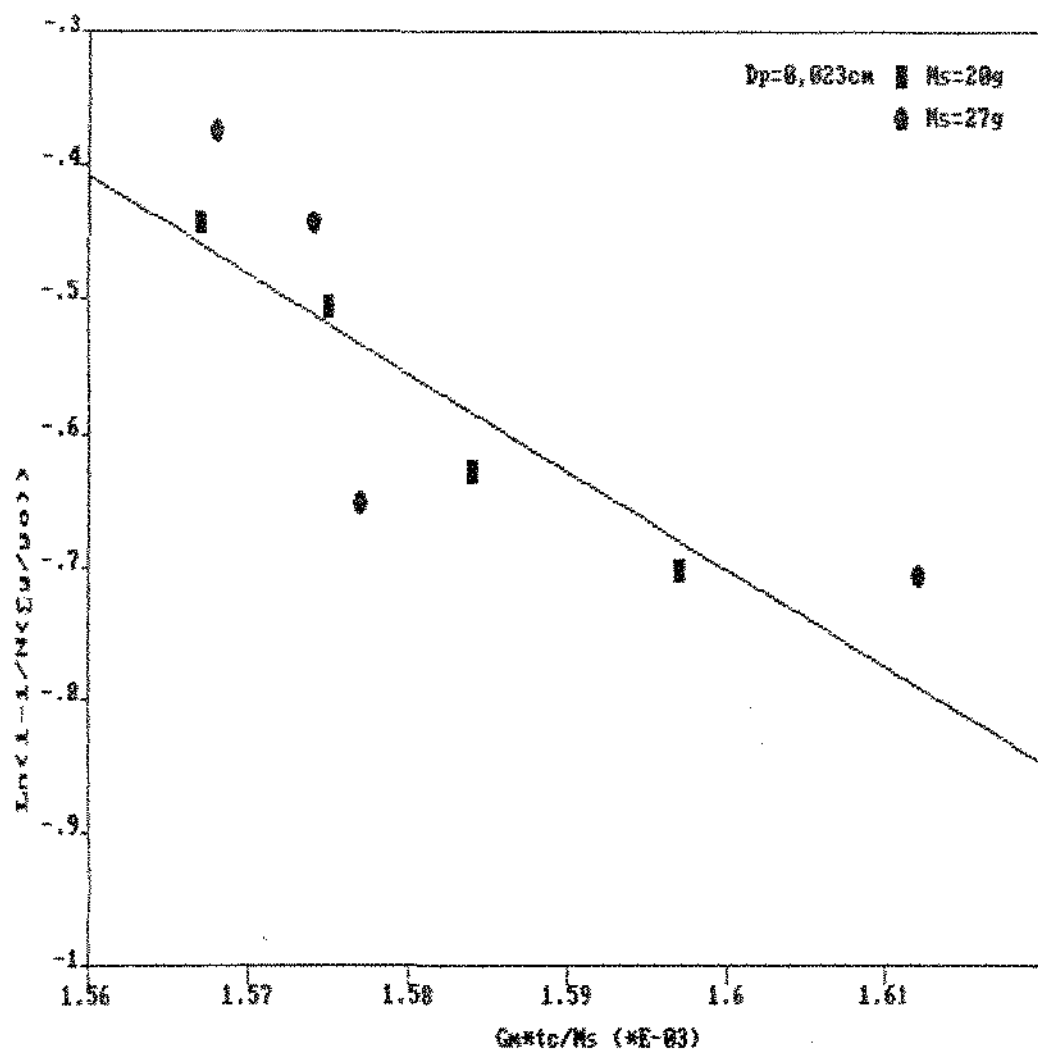


FIGURA 43: ANÁLISE DE DADOS CINÉTICOS DO SO_2 NUM
 CICLO FECHADO COM ADSORÇÃO EM CARVÃO
 ATIVADO À 25°C

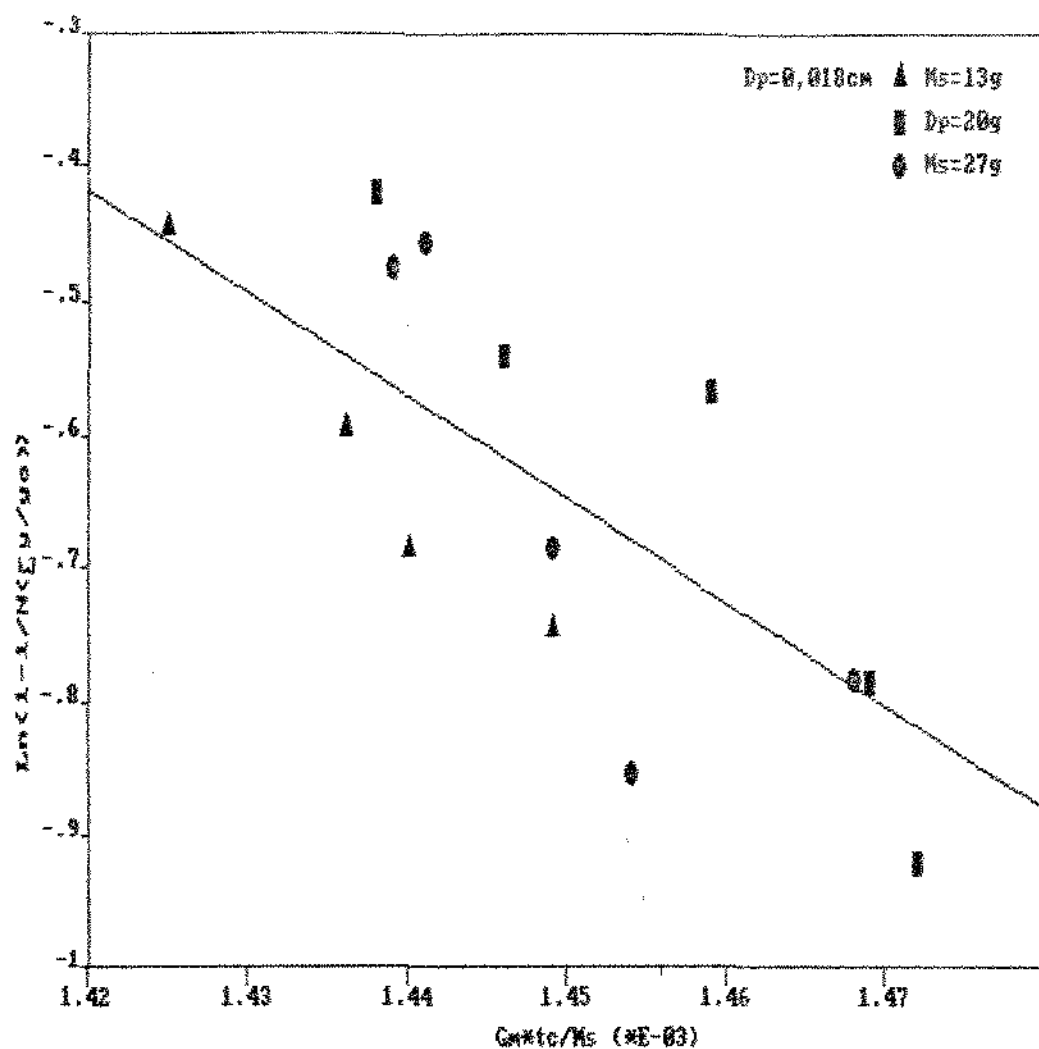


FIGURA 44: ANÁLISE DE DADOS CINÉTICOS DO SO_2 NUM CICLO FECHADO COM ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO À 25°C

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

V.1- CONCLUSÕES

V.1.1- ANÁLISE DO MÉTODO ANALÍTICO COLORIMÉTRICO

A escolha do método colorimétrico foi realizada através de uma análise minuciosa dos principais métodos quantitativos encontrados na literatura.

A quantidade do gás dióxido de enxofre determinado na curva de calibração foi da ordem 0,05% a 1,3%.

Apesar de uma série de fatores que influenciam o método, como evaporação da solução, temperatura e luminosidade, este mostrou-se adequado para os objetivos deste trabalho.

As interferências, como dióxido de nitrogênio, ozônio, ácido sulfídrico e mercaptanas, que eventualmente poderiam causar distorções na análise, foram desconsideradas por não estarem presentes na mistura gasosa.

V.1.2 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO LEITO FLUIDIZADO

A utilização de um leito fluidizado tem uma série de vantagens, como rápida mistura dos sólidos, alta taxa de transferência de massa, adaptável para operações em grande escala.

O sistema gás-sólido apresentado neste trabalho comportou-se como um leito fluidizado agregativo ou borbulhante, devido as instabilidades formadas por canais preferenciais.

Estas instabilidades provêm da placa distribuidora de forma irregular, do tamanho, dimensão e forma das partículas só-

lidas, velocidade de escoamento do gás e queda de pressão.

Nos gráficos (figuras 12, 13 e 14), que representam a queda de pressão e a vazão, obtêm uma relação linear, considerado leito fixo, até ocorrer a expansão do leito. Com o aumento da velocidade de escoamento, a queda de pressão atinge um valor substancialmente constante. No entanto, em alguns casos a agitação do leito causa o arraste de partículas mais finas. Esta representação é um indicativo para a qualidade da fluidização, especialmente quando as observações visuais não são possíveis.

Sobre a relação entre a altura do leito em função da porosidade (figuras 15, 16 e 17), mostra-se dependente da oscilação e flutuação do leito e a porosidade. O comportamento destes dois parâmetros são analisados através do diâmetro de partícula e a massa de sólido, que constituem o leito.

A analogia entre a altura do leito e a velocidade de escoamento (figuras 18, 19 e 20) estão interligadas diretamente com a porosidade do leito fluidizado. Desse modo, quantifica-se a expansão do leito com o aumento da velocidade.

V.1.3- ANÁLISE DOS DADOS CINÉTICOS

A adsorção é um processo de superfície onde ocorre aderência de fluidos à superfície sólida, conduzindo a uma reação química ou física.

Neste trabalho, considerou-se apenas um tipo de adsorção, sendo esta a adsorção física ou forças de Van de Waals, pois são forças fracas, insuficientes para que as moléculas reagam na superfície sólida. Neste tipo de adsorção, a cobertura da super-

fície é dita completa e pode ser estendida para multicamadas.

Alguns fatores afetam o processo de adsorção, como as características do adsorvente (área superficial, tamanho dos poros e composição química), características físico e químicas do adsorbato e tempo de residência do gás no sistema.

Devido à existência de poucos dados na literatura a respeito da cinética de adsorção na transferência de massa em partículas sólidas, torna-se difícil comparar os resultados encontrados neste trabalho, para o adsorvente carvão ativado.

No entanto, procurou-se analisar experimentalmente alguns parâmetros mais importantes que afetam o sistema para o processo de adsorção.

A determinação das concentrações e do número de moles adsorvido foram realizadas ao longo do tempo, como mostrado nas figuras (21 a 36) e verifica-se que o sistema gás-sólido não atinge completamente o equilíbrio, embora aproxime-se do mesmo. Este aspecto pode ser influenciado através das seguintes variáveis técnicas experimentais:

- A qualidade da fluidização
- Altura do leito, diâmetro de partícula e diâmetro do leito
- Técnica analítica insuficiente para obter valores aproximados, bem como as interferências da análise por outros gases atuantes.

As figuras 42 a 44 mostram os resultados experimentais obtidos da adsorção do SO_2 para diferentes massas ou alturas dos leitos.

Para que o modelo de Langmuir seja aplicável aos nossos dados e, por conseguinte, suas hipóteses sejam coerentes com a realidade do experimento, deve-se representar os resultados de um forma simples através de por uma linha reta que relaciona

$\ln(1-1/N(y_g/y_o))$ em função do $Gm*tc/Ms$. Com isso, supõe-se que cada partícula do leito tem o mesmo comportamento, independente da massa ou altura. Isso implica, numa mistura completa entre o gás e o sólido.

A análise do parâmetro b da isoterma de adsorção mostrou-se dependente das propriedades do adsorvente e do adsorbato a cada temperatura.

Comparando os valores de b encontrados neste trabalho com os reportados por Fraser(7), tabela 7-página 89, pode-se afirmar que o método dinâmico aqui adotado revelou-se satisfatório, pois apresentam valores da mesma ordem de grandeza.

Os resultados obtidos permitem prever quantitativamente o comportamento do carvão ativado em várias granulometrias na remoção do dióxido de enxofre a partir de gases de combustão.

V.2 - SUGESTÕES

O presente trabalho necessita ser complementado através de um conjunto de pesquisas, entre as quais destacamos as seguintes:

- Comprovação dos dados experimentais coletados através de um equipamento específico para análise do dióxido de enxofre (SO_2);
- Utilização de diferentes placas de sustentação do leito, levando em consideração o diâmetro das partículas, espessura e material para sua composição;
- Mudança na temperatura do experimento, variando-se de 25-70°C;
- Testes do comportamento do gás para temperaturas acima de 70°C, onde poderá haver a adsorção química;
- Influência dos gases dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) no processo de adsorção do gás dióxido de enxofre (SO_2), nas temperaturas correspondentes (igual e acima de 25°C);
- Proposição de um novo ajuste matemático para a isoterma e comprovação desta ser ou não linear;
- Proposição de um método experimental para análise das quantidades do dióxido de enxofre (SO_2) nos sólidos em diversas etapas da adsorção;
- Estudo da transferência de massa para o sistema de adsorção no estado de equilíbrio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- HAUG, N., DELERT, G., WEISSER, G. - "Flue Gas Desulfurization Pilot Study Phase I- Survey of Major Installations Carbon - Adsorption Flue Gas Desulfurization Process"- NATO-CGMS-Study Phase I -Appendix 95K, Alemanha, 1979.
- 2- PFEIFFER, J.B. - "Sulfur Removal and Recovery from Industrial Processes" - American Chemical Society, Washington, 1975.
- 3- STRUM, J.J. e BISCHOFF, W.F. - "FW-BF Gulf Power Demonstration Unit Interim Results" -Symposium on Flue Gas-Desulfurization, Vol. 2, New Orleans, 1976.
- 4- BROWN, G.N., TORRENCE, S.L., REPIK, A.J., STRYKER, J.L. e BALL, F.J. - "Pollution Abatement SO_2 Recovery via Activated Carbon" - Chem. Eng. Progress, vol. 68(8), pp. 55-56, 1972.
- 5- AMUNDSON, N.R. e KASTEN, P.R. - "An Elementary Theory of Adsorption in Fluidized Beds" - Industrial and Engineering Chemistry, vol. 42(7), pp. 1341-1346, 1950.
- 6- RICHARDSON, J.F. e BAKHTIAR, A.G. - "Mass transfer Between Fluidized Particles and Gas" - Trans. Inst. Chem. Engrs., vol. 36(6), pp. 281-295, 1958.
- 7- FRASER, D.A. - Final report API Project S-13, University of North Carolina, Chapel Hill, 1971.

- 8- Normas Regulamentadoras - Portaria 3214 de 8/6/1978 NR(15) - Segurança e Medicina do Trabalho - 13^o edição.
- 9- PERKINS, H.C. - Air Pollution - Ed. McGraw-Hill Kogakusha Ltd. - São Paulo, 1974.
- 10- LEITHE, W. - The Analysis of Air Pollution - Ed. Ann Arbor Publishers-U.S.A., 1971.
- 11- AZEVEDO, F.A. e DELLA ROSA, H.V. - Apostila de Toxicologia Ocupacional - 2^o edição, São Paulo, 1982.
- 12- OFFICIAL PUBLICATION OF THE LABORATORY SECTION - "Tentative Method of Analysis Sulfation Rate of the Atmosphere"- Health Lab. Science, vol.8(10), pp.243-247, 1971.
- 13- DRISCOLL, M.Y., DRISCOLL, J. and MAHONEY, K. - "Potentiometric Determination of Sulfur Dioxide in Flue Gases with an Selective Electrode" - Analyt. Chemistry, vol.45(13), pp.2283-2284, 1973.
- 14- ASTM - STAND. AMER. SOC. TEST. MATERIALS - "Tentative Method of Test for Sulfur Dioxide Content of the Atmosphere" - parte 23, pp.823-831, 1971.
- 15- PERRY, W., TABOR, E.C., and CINCINNATI - "National Air Sampling Network Measurement of SO₂ and NO₂" - Arch. Envir. Health, vol.4(3), pp.44-54, 1962.

- 16- BRITISH STANDARDS INSTITUTION - "Methods for the measurement of air pollution - Determination of Sulfur Dioxide" - BS1747, part III, London, 1969.
- 17- HOCHHEISER, S., SANTNER, J., and LUDMANN, W. - "The effect of Analytical Methods on Indicated Atmospheric SO₂ concentration" - Journal of the Air Poll. Cont. Ass., vol.16(5), pp.266-271, 1966.
- 18- CUMMINGS, W.G., REDTEARN, M.W. - "Instruments for Measuring Small Quantities of Sulphur Dioxide in the Atmosphere" - Journal of the Inst. of Fuel, vol.30(11), pp.628-635, 1957.
- 19- MCKAY, R.J. and ACKERMAN, D.E. - "Determination of Sulfur Dioxide in Small Amounts in the Atmosphere" - Ind. and Eng. Chemistry, vol.20(5), pp.538-542, 1928.
- 20- THOMAS, M.D. and CROSS, R.J. - "Automatic Apparatus for the Determination of Small Concentrations of Sulfur Dioxide in Air" - Ind. and Eng. Chemistry, vol.20(6), pp.645-646, 1928.
- 21- KATZ, M. - "Photoelectric Determination of Atmospheric Sulfur Dioxide" - Analyt. Chemistry, vol.22(8), pp.1040-1047, 1950.
- 22- KOLTHOFF, I.M. e Sandell, E.B. - Textbook of Quantitative Inorganic Analysis -3ª edição, Ed. The Macmillan Company-N.Y. 1952.

- 23- OFFICIAL PUBLICATION OF THE LABORATORY SECTION - "Tentative Method of Analysis for Sulfur Dioxide Content of the Atmosphere" - Health Lab. Science, vol.8(1), pp.42-47, 1971.
- 24- PERRY, R.R. e YOUNG, R.J. - Handbook of Pollution Analysis - Ed. John Wiley & Sons-N.Y., 1977.
- 25- LEONG, K.J., DOWD, G.F., MacFarland, H.N. - "A New Analytical Technique for Sulfur Dioxide in Air " - Am. Ind. Hyg. Ass. Journal, vol.25, pp.309-313, 1964.
- 26- STEPHENS, B.G. e Lindstrom, F. - " Spectrophotometric Determination of Sulfur Dioxide Suitable for Atmospheric Analysis" - Analyt. Chemistry, vol.36(7), pp. 1308-1312, 1964.
- 27- SYTY A. - "Determination of Sulfur Dioxide by Ultraviolet Absorption Spectrometry" - Analyt. Chemistry, vol.45(9), pp.1744-1747, 1973.
- 28- THORNTON, D.C. , DRIEDGER III, A.R. and BANDY, A.R. - "Determination of Part-per-Trillion Leves of Sulfur Dioxide in Humid Air"-Analyt. Chemistry, vol. 58(13), pp.2688-2691, 1986.
- 29- Catálogo do Fabricante - Columbia Scientific Industries Corporation - Austin. Texas(EUA) - 1975.

- 31- SINCLAIR, C. G. e ROBINSON, D. B. - "Minimum Fluidizing Velocities for Coal in Air" - Can. Journal of Chem. Eng. - vol.36(4), pp.51-58, 1958.
- 32- COULSON, J.M. e RICHARDSON, J.F. - Chemical Engineering - vol.2, 3ª edição, Ed. Pergamon Press-N.Y., 1965.
- 33- BOTTERILL, J.S.M. - Fluid-bed Heat Transfer - Ed. Academic Press Inc.(London)Ltd, 1975.
- 34- ZENZ, F.A. e OTHMER, D.F. - Fluidization and Fluid-Particle Systems - Ed. Reinhold Publishing Corporation-N.Y., 1960.
- 35- PERRY, R.H. e CHILTON, C. H. - Chemical Engineers Handbook - 5ª edição, Ed. McGraw-Hill International Book Company- SP, 1975
- 36- TOOMEY, R D e JOHNSTONE, H.F. - "Gaseous Fluidization of Solid Particles" - Chem. Eng. Progress - vol.48(5), pp.220-226, 1952.
- 37- RESNICK, W. e WHITE, R.R. - "Mass Transfer in Systems of Gas and Fluidized Solid" - Chem. Eng. Progress - vol. 45(6), pp.377-390, 1949.
- 38- HSU, C.T. e MOLSTAD, M.C. - "Rate of Mass Transfer from Gas Stream to Porous Solid in Fluidized Bed" - Ind. and Eng. Chemistry - vol.47(8), pp.1550-1559, 1955.

- 39- CHU, J.C., KALIL, J. e WETTEROTH, W.A. - "Mass Transfer in a Fluidized Bed" - Chem. Eng. Progress - vol. 49(3), pp. 141-149, 1953.
- 40- MAY, W. G. - "Fluidized-Bed Reactor Studies" - Chem. Eng. Progress - vol. 55(12), pp. 49-56, 1959.
- 41- LEWIS, W.K., GILLILARD, E.R. e GLASS, W. - "Solid-Catalyzed Reaction in a Fluidized Bed" - AIChE Journal - vol. 5(4), pp. 419-426, 1959.
- 42- KALBACK, J.C. - "Fluidization in Chemical Reactions" - Chem. Engineering - vol. 54(1), pp. 105-108, 1947.
- 43- KUNII, D. e LEVENSPIEL, O. - Fluidization Engineering - Ed. Robert E. Krieger Publishing Company-N.Y., 1977.
- 44- CHEREMISINOFF, N.P. - Handbook of Heat and Mass Transfer - vol. 2, Ed. Gulf Publishing Company-London, 1986.
- 45- RUTHVEN, D.M. - Principles of Adsorption and Adsorption Processes" - Ed. John Wiley e Sons, New York, 1984.