

FACULDADE DE ENGENHARIA

Departamento de Engenharia Mecânica e
Gestão Industrial

B - <u>ÍNDICE</u>	3
A - <u>SUMÁRIO</u>	4
B - <u>ÍNDICE</u>	5
C - <u>SIMBOLOGIA USADA</u>	6
D - <u>LISTAGEM DE GRÁFICOS E FIGURAS</u>	8
1 - <u>INTRODUÇÃO</u>	10
1.1 - <u>ENQUADRAMENTO</u>	10
1.2 - <u>OBJECTIVOS</u>	11

PROGRAMA PRODEP

Medida 4.3

Acção de Formação nº 4

2 - <u>TRABALHO EXPERIMENTAL I</u>	12
2.1 - <u>4.3.1 - A INSTALAÇÃO DE ENSAIO ESQUEMÁTICA</u>	12
2.2 - <u>PRELIMINAR DESCRITIVO DO EQUIPAMENTO</u>	13
2.3 - <u>DIMENSIONAMENTO DE UMA RESISTÊNCIA ELÉCTRICA</u>	13
2.4 - <u>O LEITO FLUIDIZADO. A TEORIA DAS DUAS FASES VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA</u>	17
2.5 - <u>QUEIMA DE PARTÍCULAS COM ELEVADO TEOR EM CÍRCULOS</u>	19
2.6 - <u>OBSERVAÇÕES IMEDIATAS</u>	19

RELATÓRIO FINAL

" Queima de partículas com alto teor em carbono em leito
fluidizado"

por

Florbelá Campos Paiva Duarte Amaral

3 - <u>TRABALHO EXPERIMENTAL II</u>	30
3.1 - <u>PARTÍCULAS COM UM SÓ DIÂMETRO ENSAIOS F30 E F31</u>	30
3.2 - <u>COMPARAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS PARA O MODELO VIA TEÓRICA/EXPERIMENTAL</u>	30
3.3 - <u>CONCLUSÕES</u>	30

Porto e FEUP, 30 de Setembro de 1993

Universidade do Rio
Faculdade de Engenharia
Biblioteca M

Nº
CDU 621(047.3)/LEM/552/ANAF
Data 01 / 10 / 2009

PARECER

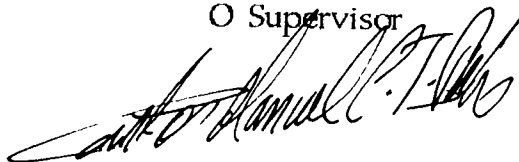
O aluno finalista do Curso de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial **FLORBELA CAMPOS PAIVA DUARTE AMARAL**, realizou no INEGI, no âmbito do programa PRODEP, medida 4.3/7/7/92/93, um estágio cujo trabalho se encontra descrito no relatório apresentado com o título **"Queima de partículas com alto teor em carbono em leito fluidizado"**.

Durante a execução do conjunto de tarefas que lhe foram atribuídas, o referido estagiário atingiu os objectivos que lhe foram propostos, mostrando ter conhecimentos adequados.

Face à qualidade do trabalho produzido cumpre-me informar que o estágio realizado se revestiu de grande interesse para a formação para esta instituição.

Porto, 27 de Dezembro de 1993

O Supervisor



PARECER

O aluno finalista do Curso de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial **FLORBELA CAMPOS PAIVA DUARTE AMARAL**, realizou no INEGI, no âmbito do programa PRODEP, medida 4.3/7/7/92/93, um estágio cujo trabalho se encontra descrito no relatório apresentado com o título **"Queima de partículas com alto teor em carbono em leito fluidizado"**.

Durante a execução do conjunto de tarefas que lhe foram atribuídas, o referido estagiário atingiu os objectivos que lhe foram propostos, mostrando ter conhecimentos adequados e empenho.

Face à qualidade do trabalho produzido cumpre-me informar que o estágio realizado se revestiu de grande interesse para a formação do aluno, como futuro engenheiro.

Porto, 27 de Dezembro de 1993

O Supervisor



B - ÍNDICE

A - <u>SUMÁRIO</u>	3
B <u>ÍNDICE</u>	4
C - <u>SIMBOLOGIA USADA</u>	6
D - <u>LISTAGEM DE GRÁFICOS E FIGURAS</u>	8
1 - <u>INTRODUÇÃO</u>	10
1 . 1 - ENQUADRAMENTO.....	10
1 . 2 - OBJECTIVOS.....	11
2 . <u>TRABALHO EXPERIMENTAL I</u>	12
2 . 1 - A INSTALAÇÃO.REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA.....	12
2 . 2 - BREVE DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	13
2.3- DIMENSIONAMENTO DE UMA RESISTÊNCIA ELECTRICA.....	13
2 . 4 - O LEITO FLUIDIZADO. A TEORIA DAS DUAS FASES VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO .REPRESENTAÇÃO GRÁFICA.....	17
2. 5- QUEIMA DE PARTÍCULAS COM ELEVADO TEOR EM CINZAS. OBSERVAÇÕES IMEDIATAS.....	19
2 . 5 . 1 - <u>Breve apresentação do modelo de queima assiciado a partículas com alto teor em cinza</u>	21
2 . 6 - MODELO DE QUEIMA DE PARTÍCULAS COM ALTO TEOR EM CARBONO. CONSIDERAÇÕES INTRODUTÓRIAS AO TEMA.....	22
2 . 6 . 1 - <u>Qeima de partículas com alto teor em carbono. observaçõesda gama de variações para FTQ</u>	28
3 - <u>TRABALHO EXPERIMENTAL II</u>	30
3 . 1 - PARTÍCULAS COM UM SÓ DIÂMETRO ENSAIOS F30 E F31 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS PARA O MODELO VIA TEÓRICA/EXPERIMENTAL. CONCLUSÕES.....	30

3 . 2 - PARTÍCULAS COM DIÂMETROS DIFERENTES.	
CONSIDERAÇÕES VÁRIAS INTRODUTÓRIAS À DEDUÇÃO DO MODELO ASSOCIADO.....	34
3 . 2 . 1 - <u>Cálculo de $d^2(t)$ e R associados aos diferentes ensaios.....</u>	37
3 . 2 . 2 - <u>Agrupamento dos ensaios F21/22; F23/26;F28/32. Observações.....</u>	38
3 . 3 - COMPARAÇÃO DE ENSAIOS REFERENTES A PARTÍCULAS IGUAIS COM PARTÍCULAS DIFERENTES F21/22 COM F30/31; F21/22 COM F28/32.....	45
4 - <u>ANÁLISE DE INCERTEZAS.....</u>	49
4 . 1 - ASSOCIADAS AO ROTÂMETRO.....	49
4 . 2 - ERROS ASSOCIADOS AOS $\dot{U}_{AR}$ DOS ENSAIOS.....	50
5 - <u>CONCLUSÕES.....</u>	51
6 - <u>REFERÊNCIAS.....</u>	52
7 - <u>ANEXOS.....</u>	53
ANEXO A	
ANEXO B	
ANEXO C	
ANEXO D	
ANEXO a	
ANEXO E	
ANEXO F	
ANEXO G	
ANEXO H	
ANEXO I	

C - SIMBOLOGIA USADA

U_t = velocidade terminal da partícula
 U_A = velocidade absoluta de subida da bolha
 u = velocidade superficial do gás
 U_{mf} = velocidade mínima de fluidização
 E_{mf} = porosidade em condições de fluidização incipiente
 D_e = diâmetro equivalente das bolhas
 x = número de vezes que a bolha "troca" o seu volume com a fase densa
 d_p = diâmetro de uma esfera com o volume da partícula
 v = volume da bolha
 D_m = difusividade molecular na fase gasosa
 D'_m = difusividade molecular efectiva
 C_p = concentração do oxigénio na fase particulada
 C_b = concentração do oxigénio na bolha à cota y acima do distribuidor
 C_s = concentração do oxigénio à superfície da partícula
 A = Área da secção recta do leito
 Q = engloba a transferência de O_2 quer por difusão quer por convecção
 d = diâmetro das partículas inertes
 d_i = diâmetro das partículas de carvão
 f = fracção queimada função do tempo
 $1/K_o$ = resistência à reacção de combustão
 H = altura do leito fluidizado
 Sh = número de Sherwood
 $n(c)$ = fracção molar de carbono consumido
 Pe_{mf} = número de Peclet
 K_j = coeficiente de transferência de massa
 n_j = número de partículas do lote j
 n_T = número total de partículas da carga
 $n_j(O_2)$ = fracção molar de difusão de oxigénio para as partículas do lote j
 d_j = diâmetro das partículas do lote j

N_j = número de partículas do lote j
 $n_T(O_2)$ = fração molar total do consumo de O_2 no leito
 t = tempo
 R = resistência total de transf. de O_2

Números Adimensionais

Pe'_{mf} = número de Peclet $\left(= \frac{U_{mf} d_j}{D'_m E_{mf}} \right)$

Sh' = número de Sherwood para partículas de tamanho d'

Sh'_j = Número de Sherwood para partículas do lote j $\left(= \frac{K_j d_j}{D'_m} \right)$

D - LISTAGEM DE GRÁFICOS E FIGURAS

- Fig 1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA INSTALAÇÃO
- Fig 2 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DUM LEITO FLUIDIZADO
- Fig 3 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA TEORIA DAS DUAS
FASES
- Fig 4 - ILUSTRAÇÃO DO GRÁFICO REPRESENTATIVO DA
VEL. DE FLUIDIZAÇÃO
- Quadro I - QUEIMA DE PARTÍCULAS COM TEOR DE CARBONO
DIVERSO
- Quadro II - QUEIMA DE PARTÍCULAS COM TEOR DE CARBONO
DIVERSO
- Fig 5 - ILUSTRAÇÃO DA QUEIMA DE UMA PARTÍCULA DE
COQUE EM LEITO FLUIDIZADO
- Fig 6 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE O_2 AO LONGO DE H
- Fig 7 - LINHAS DE FLUXO NA VIZINHANÇA DE UMA BOLHA
NUM LEITO FLUIDIZADO
- Quadro III - MODELOS PARA TRANSF. DE MASSA DE ESF. EM
LEITO FLUIDIZADO
- Quadro IV - RESULTADOS DA QUEIMA DE PARTÍCULAS COM ALTO
TEOR DE CARBONO
- Quadro V - RESULTADOS DA QUEIMA DE PARTÍCULAS COM ALTO
TEOR DE CARBONO
- Gráfico 1 - COMPARATIVO DOS MODELOS COM $\emptyset=1$ E $\emptyset=2$
- Quadro VI - RESULTADOS $f = f(\emptyset)$ PARA $\emptyset=1$ E $\emptyset=2$
- Quadro VII - VALORES REFERENTES AO ENSAIO F30
- Quadro VIII - " " " " F31
- Gráfico 2 - COMPARATIVO DOS ENSAIOS F21/22
- Gráfico 3 - " " " F23/26
- Gráfico 4 - " " " F28/32

Gráfico 5 - COMPARATIVO DOS ENSAIOS F21/22 E 30/31
Gráfico 6 - " " " F21/22 E 28/32

A - SUMÁRIO

Estudo do comportamento apresentado na combustão de cargas de carvão em leito fluidizado. Utilizam-se cargas com diâmetros d_i de 3mm a 5mm, previamente seleccionadas e tratadas em laboratório.

Preparou-se um leito de queima com uma altura H de 15cm e 20cm constituído por partículas de um material inerte, neste caso areia, cujo diâmetro d , se considerou de 0,5cm e 0,65cm.

Consideraram-se como condições de operação uma temperatura $T=1242$ K e pressão atmosférica que rondou quase sempre o valor de $1,02 \times 10^5$ N/m².

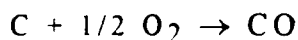
Devem referir-se aqui algumas particularidades deste estudo. Ele desenvolveu-se à volta duma propriedade que, como se demonstrará posteriormente (por comparação com modelos de queima apropriados) será determinante. Trataram-se de partículas com alto teor em carbono.

Através da queima conjunta de várias partículas, fez-se um estudo para duas situações distintas:

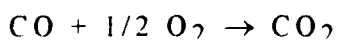
- queima de partículas com o mesmo diâmetro.
- queima de partículas com diâmetros diferentes.

Registado o comportamento de queima, seguido de tratamento e análise dos resultados, chegamos à conclusão de que os modelos de queima seguidos por uma e outra situação, são bem distintos, como aliás se pode comprovar pela análise dos gráficos ($R.f$) e ($f.t$) para várias amostras.

Relativamente ao modelo seguido por partículas com $d=const$ explica-se pela formação numa primeira fase CO, através da reacção:



Só posteriormente se forma Dióxido de Carbono



1 - INTRODUÇÃO

1.1 - ENQUADRAMENTO

O leitor deste trabalho pode procurar uma primeira abordagem deste tema, cuja apresentação é feita com a simplicidade própria de quem toma contacto com uma matéria tão vasta quanto complexa pela primeira vez. Não tem este, ambição de construir um estudo profundo próprio ao projecto de um qualquer equipamento, o projecto por exemplo de um queimador.

Não deixará contudo de ser importante clarificar que o trabalho apresentado, é o resultado de vários meses de trabalho mais ou menos regular, realizado metodicamente e sobretudo observando o maior rigor possível, na obtenção e manipulação de todos os parâmetros intervenientes. A comprovar tal afirmação, vêm apresentados os resultados que, como seria de esperar seguem os modelos propostos e já amplamente comprovados.

Depois desta chamada de atenção para as circunstâncias envolvidas, vai-se tornando urgente introduzir o tema proposto.

A queima de carvão em leito fluidizado é por norma realizada em leitos de um material inerte (areia ou cinzas) que se encontram a temperaturas da ordem dos 973K a 1273K. As partículas de combustível (carvão, coque) são lançadas para o interior deste banho. As condições são criteriosamente seleccionadas, permitindo o estudo da transferência de massa da fase densa de um leito fluidizado de partículas inertes, para uma ou várias partículas de coque que ardem nesse leito, duma forma mais precisa através da obtenção e interpretação dos resultados experimentais.

1 2 - OBJECTIVOS

Observar o comportamento na queima de partículas com alto teor em carbono para as seguintes combinações :

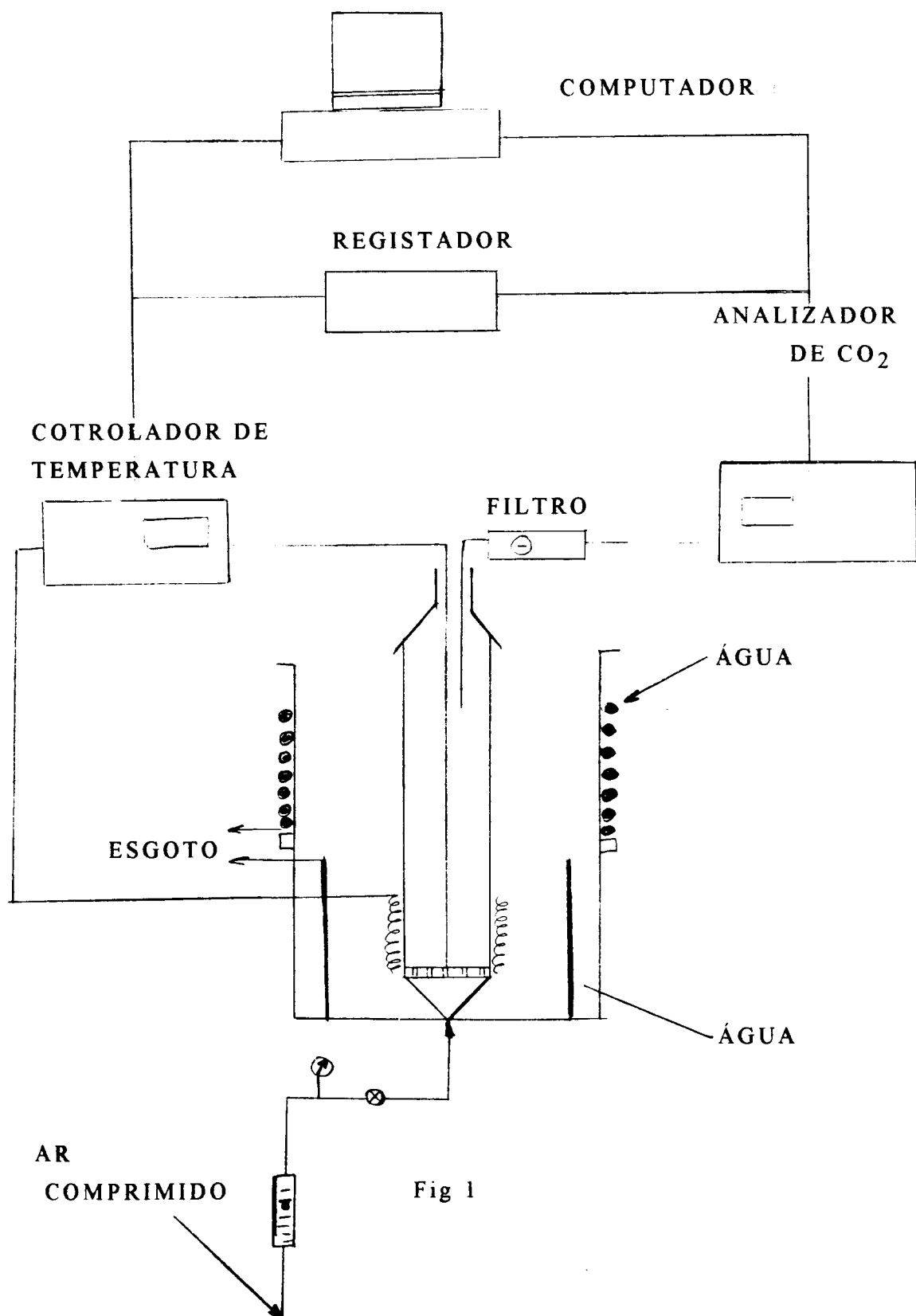
- cargas com partículas de diâmetros iguais
- cargas com partículas de diâmetros d_i muito diferentes
- cargas com partículas de diâmetros d_i muito semelhantes

Estabelecer comparações entre os resultados obtidos e os modelos de queima adoptados: modelo de queima de partículas com o mesmo diâmetro e, modelo de queima para partículas de diferentes diâmetros.

Breve referência ao comportamento apresentado na queima de partículas com alto teor em cinza, com a intenção de mostrar algumas diferenças fundamentais relativamente ao comportamento apresentado pelas partículas com alto teor em carbono, objectivo principal deste estudo

2 . TRABALHO EXPERIMENTAL I

2 . 1 - A INSTALAÇÃO. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA

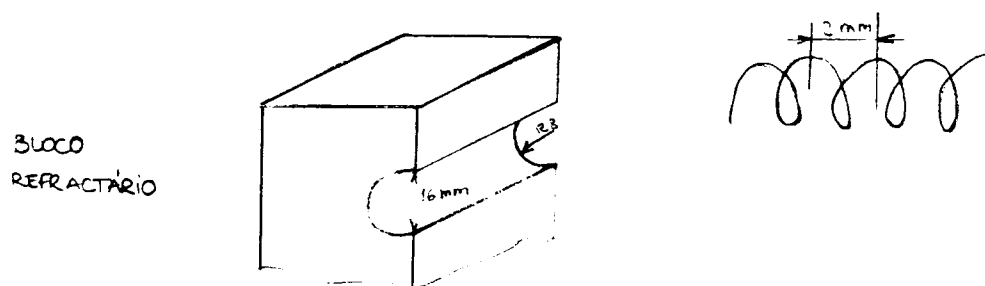


2 . 2 - BREVE DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

A montagem experimental para os trabalhos de combustão é constituída por um leito fluidizado, materializado por um tubo de aço refractário com o diâmetro 80mm, contendo areia ($d=0,5$ e $d=0,65\text{mm}$) um distribuidor (placa perfurada com x orificios de y diâmetro). O leito foi aquecido exteriormente usando electricidade, introduzindo um termopar no leito ligado a um controlador de temperatura que regulamos previamente para 950°C ou seja 1223K. A combustão decorre a temperatura mais ou menos constante (variação de $\pm 5\text{K}$) com um erro aproximado de 0,4%.

A concentração de CO_2 à saída é continuamente monitorizada, através do analizador de CO_2 que se encontra ligado ao computador que faz a aquisição contínua de dados. Após cada ensaio o programa permitia a obtenção da fracção total de CO_2 do gás de saída. Neste caso, quando FTQ apresentava valores fora da gama 90% a 100% de carbono, o ensaio era desprezado.

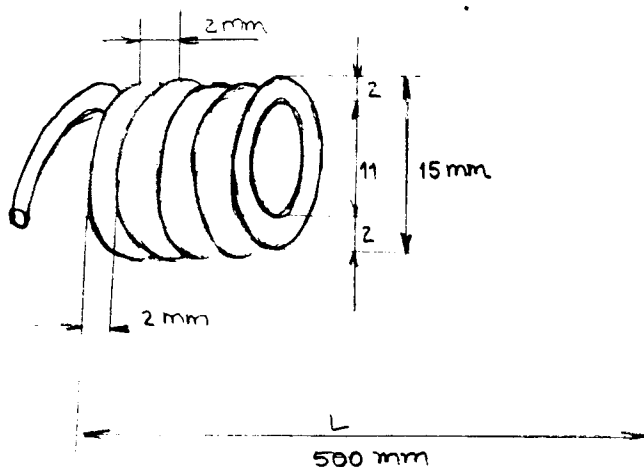
2 . 3 - DIMENSIONAMENTO DA RESSINTÊNCIA ELÉCTRICA



Para o dimensionamento da resistência calculam-se

$\varnothing$ fio condutor

L fio condutor



i) Conhecidas as características de Tensão, Corrente e Potência eléctrica do sistema

$$V=220V_{ot}$$

$$I= 32 \text{ A}$$

$$Pot=VI=7040 \text{ [VA]}$$

ii) Para estas características

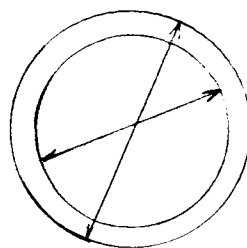
$$R = \frac{V}{I} = \frac{220}{32} = 6,875 \text{ ohms}$$

iii) Resistência/metro de fio condutor

$$\text{Sabendo } D_{ext_{cav}} = 16\text{mm}$$

$$D_{ext_{esp}} = 15\text{mm}$$

$$\varnothing_{fio} = 2\text{mm}$$



Para $\varnothing_{fio}$ condutor de 2mm com fio "KANTAL DSD" (seleccionado pelas suas propriedades de baixo peso para uma boa resistência por metro de fio) retiram-se os seguintes valores teóricos:

$$R/\text{metro} = 0,430 \text{ Ohms/m}$$

$$\text{Peso} = 22,78 \text{ Kg/1000m}$$

iv) Cálculo da L

$$R = 6,875$$

$$L = \frac{6,875}{0,430} = 16\text{m}$$

v) Cálculo do nº de espiras

$$\frac{\text{nº de espiras}}{\pi \times \text{Despira}} = \frac{L_{\text{comp}}}{\pi \times 15 \times 10^{-3}} = \frac{15,1}{\pi \times 15 \times 10^{-3}} = 320 \text{ espiras}$$

comp. resist = nº de espiras x espessura de cada espira

Tabela de comparação das resistências por metro e dos pesos dos fios «KANTHAL DSD» e «CROMONIQUEL 80/20», e por onde se verifica a GRANDE VANTAGEM DO FIO «KANTHAL DSD»

Diâmetro m/m	KANTHAL DSD		CROMONIQUEL 80/20	
	Ohms/m	1.000 m pesem kgs.	Ohms/m	1.000 m pesem kgs.
0,05	687,6	0,014	550,00	0,016
0,08	350,8	0,036	215	0,042
0,10	171,8	0,057	138	0,066
0,12	119,3	0,082	95,50	0,094
0,15	76,4	0,128	61,1	0,147
0,20	42,97	0,228	34,4	0,262
0,25	27,50	0,356	22,0	0,409
0,30	19,10	0,513	15,3	0,590
0,35	14,03	0,697	11,2	0,806
0,40	10,74	0,911	8,59	1,050
0,45	8,488	1,153	6,77	1,320
0,50	6,876	1,424	5,50	1,640
0,55	5,673	1,725	4,54	1,980
0,60	4,775	2,049	3,82	2,360
0,65	4,068	2,406	3,25	2,770
0,70	3,508	2,790	2,81	3,210
0,75	3,056	3,203	2,44	3,690
0,80	2,686	3,644	2,15	4,190
0,85	2,379	4,114	1,90	4,740
0,90	2,121	4,612	1,70	5,310
0,95	1,905	5,139	1,52	5,910
1	1,719	5,694	1,38	6,550
1,2	1,193	8,200	0,95	9,430
1,4	0,877	11,160	0,70	12,80
1,6	0,671	14,58	0,54	16,80
1,8	0,530	18,45	0,42	21,20
2	0,430	22,78	0,34	26,20
2,5	0,275	35,59	0,22	40,90
3	0,191	51,25	0,15	59,00
3,5	0,140	69,75	0,112	80,20
4	0,107	91,11	0,086	105,00

Os valores ohmicos indicados são "valores teóricos" que variam um tanto na prática

A AKTIEBOLAGET KANTHAL, com fábricas na Suécia, América do Norte, Brasil e na Itália, conseguiu introduzir o seu material em todos os países do mundo, graças às qualidades extraordinárias dos seus produtos.

2.4 - O LEITO FLUIDIZADO

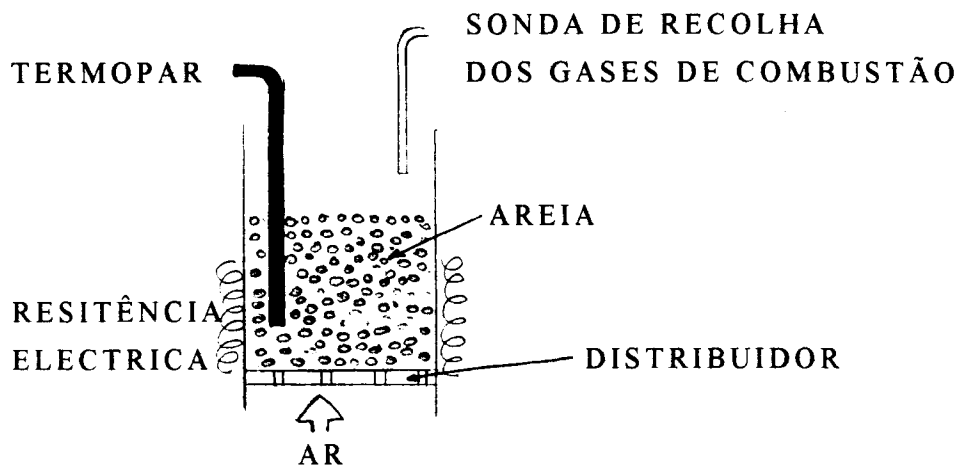


Fig 2

A TEORIA DAS DUAS FASES

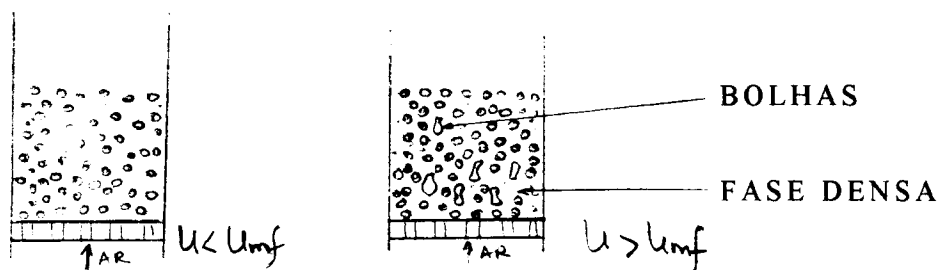


Fig 3

GRÁFICO REPRESENTATIVO DA VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO (NO CASO COM DISTRIBUIDOR COM $d_t = 8\text{cm}$)

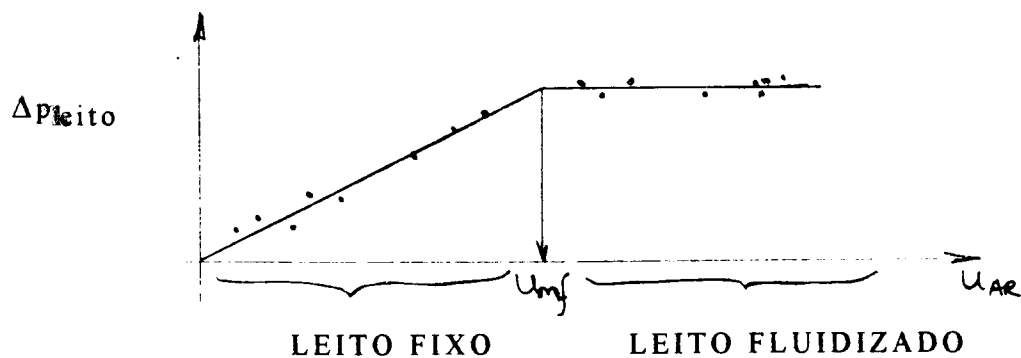


Fig4

Relativamente às ilustrações anteriores cabe aqui a chamada de atenção para os anexos A e B, contendo os valores reais para o estudo que aqui decorre.

No anexo A constam os seguintes assuntos :

- Dimensionamento do distribuidor
- Construção de gráfico representativo da velocidade de fluidização para distribuidor com $d_t = 8\text{cm}$

Do anexo B podem extrair-se informações acerca de:

- Calibração do analizador de CO
- Calibração do rotâmetro
- Obtenção dos parâmetros do controlador de temperatura que controla o termopar tipo K.

2 . 5 - QUEIMA DE PARTÍCULAS COM ALTO TEOR EM CINZA

PRIMEIRA SÉRIE DE ENSAIOS (93/01/14)				
CONDIÇÕES : $p_{dia} = 1.0205$ e $5 \text{ N/m}^2 = 1.0205$ e 6 dyn/cm^2				
t operação=1241k				
u=23.612 cm/s				
d=0,5cm				
xco2=0.0415%				
h=15cm				
fcf=0.573				
ENSAIO	ASPECTO	M (g)	FTQ (%)	FCF/REAL (%)
F1	Baça	0,1116	93,7	53,7
F2	Brilhante	0,1045	108,9	62,4
F3	Brilhante	0,1055	93,5	53,6
F4	Baça	0,1041	189	108
F5	Brilhante	0,1096	67,1	38,45
F6	Brilhante	0,112	165,7	94,95
F7	—	0,1088	106,8	61,22

Quadro I

SEGUNDA SÉRIE DE ENSAIOS (93/01/02)				
CONDIÇÕES: $p_{dia} = 1.0187$ e $5 \text{ N/m}^2 = 1.0187 \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2$				
t operação=1241K				
u=4.476cm/s				
d=0.5cm				
xco2=0.0415%				
h=15cm				
fcf=0,573				
ENSAIO	ASPECTO	M (g)	FTQ (%)	FCF/REAL (%)
F8	—	0,104	153,50%	88
F9	—	0,1035	71,40%	40,9
F10	—	0,1068	93,10%	53,36

Quadro II

Relativamente aos ensaios anteriores nota-se a grande disparidade de valores de FTQ, FRACÇÃO TOTAL QUEIMADA.

Verifica-se que o aspecto baço das partículas coincide com aquelas que apresentam alto teor em carbono. Depois da queima, as partículas com alto teor em cinza apresentam-se duras, comportamento contrário ao apresentado pelas partículas com alto teor em carbono que se desfazem muito facilmente. É precisamente o comportamento destas últimas que vamos explorar cuidadosamente.

2.5.1 - Breve apresentação do modelo de queima associado a partículas com alto teor em cinza:

Quando se queimam partículas de carvão em leito fluidizado várias são as resistências encontradas pelo oxigênio até atingir a superfície das partículas. Neste caso particular é de sublinhar a resistência oferecida pela cinza, que não sendo consumida durante a queima, no final do processo se apresenta com uma dureza elevada como comprovado experimentalmente.

Partindo das equações de balanço de massa e das expressões para as resistências da cinza e da fase densa, desprezando a resistência entre a bolha de ar e a fase densa, para além da resistência cinética chega-se à seguinte expressão que contabiliza o cálculo da resistência total:

$$\frac{1}{K_o} = \frac{d(t=0)}{\phi \times Sh \times D' m} = \frac{d(t=0)}{2 \times \phi \times D'' c} = \frac{d(t=0) - d(t)}{d(t)}$$

cujas primeiras parcelas do segundo membro é a resistência na fase densa, sendo a segunda aquela que representa a resistência da cinza.

Podem encontrar-se no anexo A curvas características de comportamento destas partículas.

Juntam-se aqui os anexos C e D. O anexo C introduz os seguintes pontos:

- determinação da massa específica do carvão
- como determinar a fracção de carbono fixo - FCF

Quanto ao anexo D, podem consultar-se os seguintes pontos:

- integração das curvas $X_{CO_2,t}$ relativas aos ensaios F3, F4, F5, F6 e F7, para determinação de FTQ e FCF

2 . 6 - MODELO DE QUEIMA DE PARTÍCULAS COM ALTO TEOR EM CARBONO.

ALGUMAS CONSIDERAÇÕES QUE INTRODUZEM O TEMA

Existem vários tipos de queimadores, dos quais dois são particularmente usados na indústria: leitos fluidizados atmosféricos (produção de vapor ou calor) e leitos fluidizados pressurizados (produção de electricidade).

Em CLF há dois modos distintos de operação limite normalmente considerados. Assim na indústria, o carvão é queimado em contínuo enquanto que à escala laboratorial, os estudos se desenvolvem normalmente com a queima de cargas isoladas, procedimento aliás seguido neste trabalho.

Quando introduzidas no queimador, as partículas de carvão perdem além de água, a matéria volátil que as constitui num processo denominado desvolatilização. Após este fenómeno inicia-se a combustão de coque residual. A desvolatilização e a combustão de coque remanescente são fenómenos normalmente estudados em separado. Neste trabalho não se fez um estudo sobre a desvolatilização.

Para a combustão em leito fluidizado de partículas Davidson e Harrison (1963) estabeleceram um modelo físico muito simples. É um modelo que descreve bem o processo que envolve a movimentação do gás e dos sólidos em leitos fluidizados. Consideraram basicamente que o leito se compõe de duas fases:

- 1ª fase - fase particulada, (ou densa ou ainda emulsão)
cujo comportamento é aquele que se atribui ao leito em condições de fluidização incipiente.
- 2º fase - fase de bolhas, que comporta o excesso de gás relativamente à velocidade mínima de fluidização.

Quando se faz o estudo da combustão de partículas de coque em leito fluidizado, há um conjunto de processos físicos e químicos a considerar. Estão entre estes a transferência de O_2 entre a fase de

bolhas e a fase densa, o transporte de O_2 da fase densa para a partícula de coque a cinética da reação de combustão, o transporte de O_2 nos poros da partícula de coque e a fase particulada e finalmente o atrito e fragmentação.

A figura 5 ilustra o que se acabou de referir para uma partícula de coque que arde em leito fluidizado

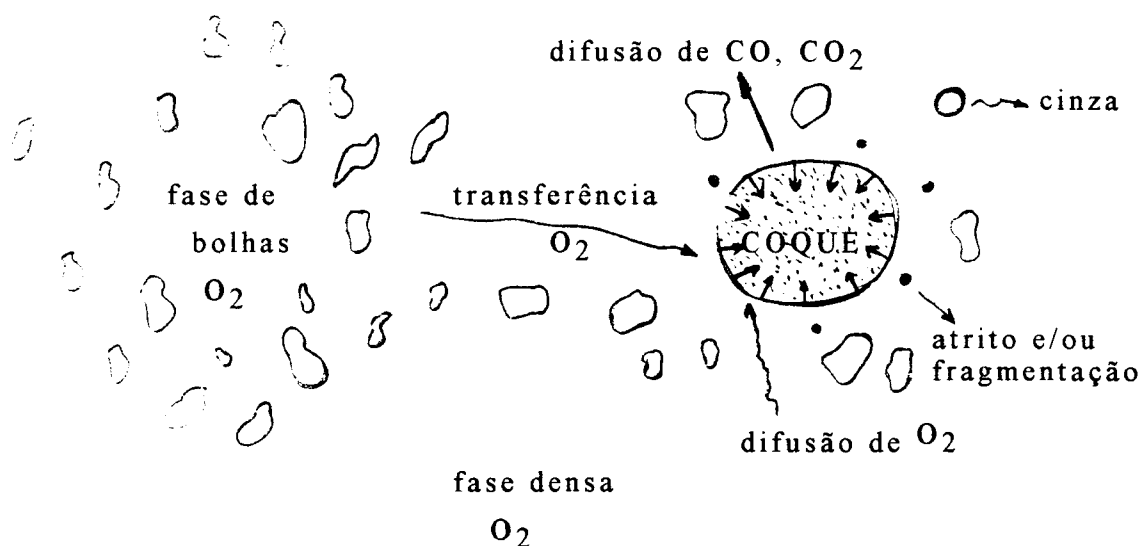


Fig5

Além da teoria das duas fases há ainda outros pressupostos a considerar, segundo o modelo de Avedesian e Davidson (1973):

- 1) A fase densa está perfeitamente agitada
- 2) As bolhas sobem através do leito em fluxo pistão, transferindo gás para a fase densa o que implica uma variação da concentração de O_2 nas bolhas ao longo do leito fluidizado de altura H .
- 3) As bolhas podem ser caracterizadas por um diâmetro equivalente D_e (diâmetro da esfera cujo volume é igual ao volume de uma bolha)

A figura seguinte ilustra a variação da concentração de O_2 variando ao longo da altura H , pela representação esquemática de um leito fluidizado.

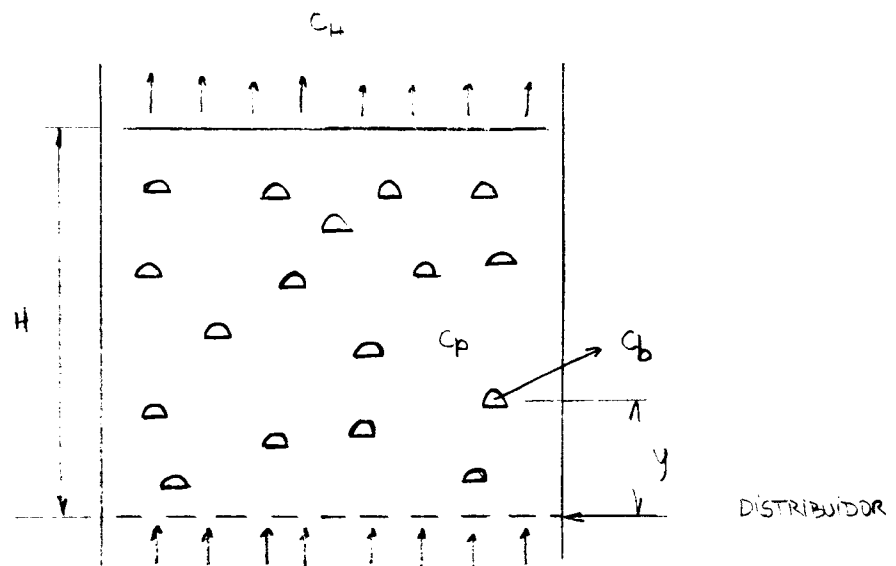


Fig6

Fazendo um balanço material a uma bolha que sobe através do leito podemos escrever:

$$Q = (C_p - C_b) = V \frac{dC_b}{dt} = U_A V \frac{dC_b}{dy}$$

onde:

$Q = q + K_G S$, engloba a transferência de O_2 quer por difusão quer por convecção

V - é o volume da bolha

C_p - concentração de O_2 na fase densa perfeitamente agitada

C_b - concentração de O_2 na bolha à cota y acima do distribuidor

U_A - velocidade de subida da bolha e que pode ser calculada por uma expressão desenvolvida por Davidson e Harrison em

1963:

$$U_A = (U - U_{mf}) + 0,711 (g De)^{1/2}$$

Davidson e Harrison (1963) a quem se juntaram Hovmond e Davidson (1968) são responsáveis pela dedução de expressões relativas a outros parâmetros igualmente importantes, neste caso X:

$$X = \frac{6,34 H m f}{De (g De)^{1/2}} \left[U m f + \left(\frac{E m f}{1 + E m f} \right) \frac{1,3 D m \ g^{1/2} \ De^{1/4}}{De^{1/4}} \right]$$

sendo X uma medida adimensional que traduz a oportunidade de transferência entre bolhas e a fase densa: Por outras palavras, a quantidade de vezes que uma bolha "troca" o seu volume com a fase densa quando atravessa o leito.

O primeiro pressuposto do modelo físico proposto por Davidson e Harrison, que se refere à FASE PARTICULARIDADE PERFEITAMENTE AGITADA, tem sido alvo de alguma contestação. Na realidade a validade deste está dependente da relação verificada entre U_A (velocidade de subida de bolhas) e a velocidade da fase de emulsão U_{mf}/E_{mf} . Dois casos extremos podem ocorrer:

- a) $U_A > \frac{U_{mf}}{E_{mf}}$ - bolhas rápidas e o gás circula através de uma nuvem que envolve a bolha
- b) $U_A < \frac{U_{mf}}{E_{mf}}$ - bolhas lentas e o gás da fase de emulsão utiliza a fase bolhas como um caminho mais curto

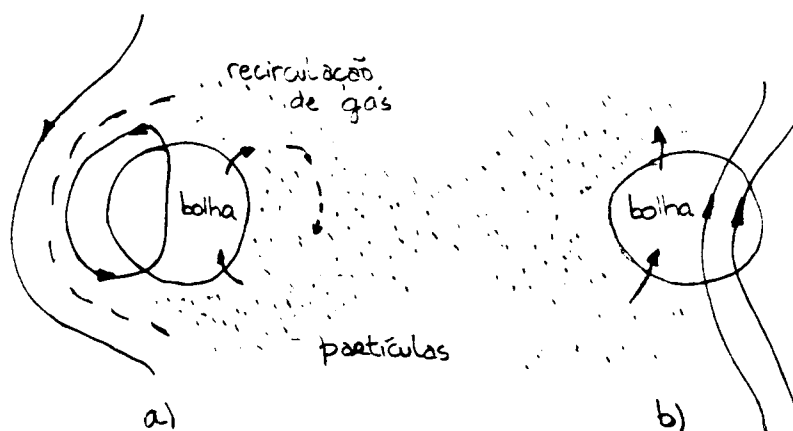


Fig 7 - Linhas de fluxo na vizinhança de uma bolha num leito fluidizado

De facto só é lícito considerar a fase de emulsão perfeitamente agitada, para a situação em que $U_A > U_{mf}/E_{mf}$. No segundo caso pelo contrário, o mais correcto será supôr fluxo pistão. A transição entre um e outro caso estará dependente de U_{mf} e De :

Neste trabalho as condições de operação em causa e U_{mf} baixas, considera-se o regime de fluxo de gás, descrito pela situação a), podendo por conseguinte considerar-se a fase densa bem agitada. Poder-se-à encontrar anexado em G o procedimento que permitiu esta conclusão.

No que respeita ao transporte de O_2 da fase densa para a partícula de coque, podemos considerar a combustão em leito fluidizado um sistema diluído, uma vez que apenas um pequeno número de partículas que constituem o leito são reactivas.

A taxa de transferência de oxigénio do leito para a partícula de coque pode ser dominante na avaliação da taxa total de combustão. Deve também conhecer-se a influência das partículas inertes na taxa de difusão do O_2 .

O transporte de oxigénio pode caracterizar-se através dum coeficiente de transferência de massa K . Este coeficiente de transferência pode quantificar-se de forma adimensional através do número de Sherwood, $Sh = \frac{K d_1}{D_m}$ sendo d_1 , o diâmetro da partícula "activa" e D_m a difusividade de O_2 no ar.

Estudos posteriores revelaram a influência do diâmetro das partículas inertes "d" no número de Sh . Os autores destes estudos concluíram ainda que as taxas de transferência de massa em leito fluidizado não dependem da velocidade superficial total do gás, mas sim da velocidade de fluidização U_{mf} . A taxa total de combustão baseada na medição da perda de massa das partículas durante a queima pode estar sujeita a vários erros, uma vez que esta técnica implica a interrupção repetida do processo de combustão.

Resultando de vários estudos, Coelho e Guedes de Carvalho (1988) desenvolveram uma expressão analítica para a equação de transferência de massa. O resultado final, após resolução numérica desta equação é apresentado na tabela seguinte.

MODELOS PARA TRANSFERÊNCIA DE MASSA DE ESFERAS GRANDES Mergulhadas NUM LEITO FLUIDIZADO DE PEQUENAS PARTÍCULAS INERTES

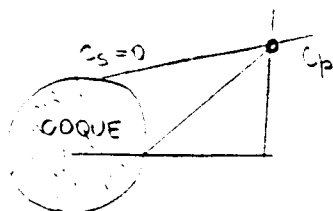
REFERENCIA	MODELO	EQUAÇÃO	COMENTARIOS
Tamann (1981)	$Sh = 0.248 Ga^{1/3} (d_p/d)^{1/2}$	T1	Consideração de uma camada limite. Aplicável a leitos fluidizados
La Nauze e Jung (1982)	$Sh = 2 \epsilon + 0.69 \left(\frac{Re}{\epsilon} \right)^{1/2} Sc^{1/3}$	T2	Adaptação da equação de Frossling. Dependência explícita de U_o
La Nauze et al (1984)	$Sh = 2 \epsilon_{mf} + \left[\frac{4 \epsilon_{mf} d_1}{\pi D_m} \left(\frac{U_{mf}}{\epsilon_{mf}} + U_A \right) \right]^{1/2}$	T3	Transferência de massa composta por dois termos: um relativo a convecção do gás, outro relativo ao movimento das partículas
Prins et al (1985)	$\epsilon_{mf} (U_D)_{mf} Re_{mf}^m = 0.105 + 1.505 (d_p/d)^{-1.05}$ $m = 0.35 + 0.29 (d_p/d)^{-0.5}$ $(0.1 < Re_{mf} < 20 \text{ e } 1 < d_p/d < 200)$	T4	Correlação empírica baseada em experiências de sublimação de esferas de naftalina
Guedes de Carvalho e Coelho (1986)	$Sh = 2 \epsilon_{mf} + \epsilon_{mf} \left[\frac{4 d}{\pi D_{eff}} \left(\frac{U_{mf}}{\epsilon_{mf}} + U_A \right) \right]^{1/2}$	T5	Forma corrigida de T3 considerando que a fase particulada é composta por poros perpendiculares a superfície da partícula
La Nauze e Jung (1986)	$Sh = 2 \epsilon_{mf} + \left[\frac{4 \epsilon_{mf} d_1}{\pi D_{eff}} \left(\frac{U_{mf}}{\epsilon_{mf}} + \frac{6.93 U_A \epsilon_{mf} d_1}{D_o} \right) \right]^{1/2}$	T6	Forma alternativa de T3 usando a frequência de formação das bolhas para estimar o termo relativo ao movimento das partículas
Coelho e Guedes de Carvalho (1988)	$Sh = \frac{\epsilon}{\sqrt{2}} \left[4 + 0.576 Pe_{mf}^{0.78} + 1.28 Pe_{mf} + 0.141 \left(\frac{d}{d_1} \right) Pe_{mf}^2 \right]^{1/2}$	T7	Formulação efectuada inicialmente para leito fixo e extrapolado para leito fluidizado

Quadro III

Foi esta expressão (T7) a utilizada no trabalho presente para o cálculo do número de Sherwood. Os autores realizaram uma série de experiências e, os resultados obtidos revelaram excelente concordância com a teoria desenvolvida. As experiências realizadas em leito fluidizado confirmaram também que os números de Sh não dependem de U mas sim de U_{mf} .

Como definir qual o modelo de queima adoptado numa determinada situação? Também aqui foram desenvolvidos diversos estudos tendo em conta os mecanismos das reacções que ocorrem durante o processo de combustão. No caso deste estudo face aos resultados experimentais obtidos, o modelo adoptado é designado por $\phi=2$.

Duma forma simplificada no modelo $\Theta=2$, admite-se que a velocidade de redução do CO_2 à superfície da partícula é tão baixa que se pode considerar desprezável. O monóxido que se forma através da reacção $\text{C} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$ e, a sua posterior oxidação a CO_2 é considerada a uma velocidade finita, ocorrendo a uma distância significativa da partícula.



$$n(c) = \pi d_p^2 \times K \times (C_p - C_s) / s$$

$$Sh = \frac{K d_p}{D_m}$$

Nas experiências de queima em leito fluidizado, operou-se em condições em que não foi importante a transferência de O_2 da fase de bolhas para a fase particulada. Para tal utilizaram-se cargas pequenas, de modo a que a concentração de O_2 na fase densa, C_p , pôde considerar-se muito próxima de C_0 (a concentração molar do oxigénio à entrada).

2.6.1 - Queima de partículas com alto teor em carbono (devendo apresentar FTQ entre os 90 e os 100%)

QUEIMA (93/05/21)				
ROT 6A - 150G - POS 7S				
CONDIÇÕES: $p_{dia} = 1.012 \text{e}6 \text{dyn/cm}^2$				
$t_{dia} = 292\text{K}$		$t_{operação} = 1242\text{K}$		
$u = 27,26 \text{cm/s}$		$d = 0,65 \text{cm}$		
$X_{co2} = 0,0403$		$h = 20 \text{cm}$		
$f_{cf} = 0,787$				
ENSAIO	ASPECTO	m (g)	FTQ (%)	FCF/REAL (%)
F21	-----	0,2273	95,5	
F22	-----	0,2388	95,6	
F23	-----	0,417	81,7	
F24	-----	0,4379	88,4	

Quadro IV

QUEIMA (93/05/24)				
ROT 6A - 150G - POS 5S				
CONDIÇÕES: $p_{dia}=1.002e6 \text{ dyn/cm}^2$				
tdia=292K		t operação=1242K		
u=29,94cm/s		d=0,5cm		
Xco2=0,0415		h=20cm		
fcf=0,787				
ENSAIO	ASPECTO	m (g)	FTQ(%)	FCF/REAL (%)
F26	-----	0,4478	87,8	
F30	-----	0,2316	89,8	
F31	-----	0,2565	88,8	
F32	-----	0,1615	91,9	

Quadro V

Dos ensaios aqui registados os referentes a F30 e F31 apresentam algumas particularidades. Do anexo E constam:

- calculo do d_{ap} das particulas dos ensaios F30 e F31
- condições adicionais para queima

No anexo F constam as seguintes informações:

- listagem de valores obtidos experimentalmente de f , $t(s)$ e $1/Ko [s/n]$.
- listagem das fracções totais de quima obtidas da análise das curvas X_{co2} , que se juntam.

3 - TRABALHO EXPERIMENTAL II

3.1 - PARTÍCULAS COM UM SÓ DIÂMETRO

Os ensaios em que $d(t) = \text{const}$ são os referidos por F30 e F31, para estes:

$$F30 \rightarrow \text{FTQ} = 89,8\% \cong 90\%$$

$$F31 \rightarrow \text{FTQ} = 88,8\% \cong 89\%$$

valores que estão de acordo com o intervalo previamente estabelecido para FTQ

O cálculo da resistência pode ser dado pela expressão:

$$K = \frac{\pi d^2(t) \times (0,21 - \Delta x)}{U.A. \Delta x}$$

Por outro lado o modelo teórico estabelece para a resistência a expressão:

$$K = \frac{1}{K_0} = \frac{d(t)}{\phi Sh' D'm}$$

Sabendo que $d_i(t=0) = 4,28\text{mm} = d_1$

$$U_{mf\text{exp}} = 17,66\text{cm/s}$$

$$Sh = \frac{E}{\sqrt{2}} \left[4 + 0,576 Pe_{mf}^{0,78} + 1,28 Pe_{mf} + 0,41 \left(\frac{d}{d_1} \right) Pe_{mf}^2 \right]^{1/2}$$

$$D'm = \frac{D_m}{\sqrt{2}}$$

$$Pe_{mf} = \frac{(Umf/E)dl\sqrt{2}}{Dm} = \frac{Umf}{E} \times dl \times D'm$$

$$d_{arcia} = 0.65mm$$

MODELO TEÓRICO:

$$K^{-1} = \frac{d(t)}{\emptyset Sh' D'm}$$

$$d(t) = d_i (1-f)^{1/3} \quad \wedge \quad d_i = 4,28 \times 10^{-3}$$

$$Sh' = 1,979 \cong 2$$

$$D'm = 1,808 \times 10^{-4}$$

Sejam os modelos $\emptyset=1$ e $\emptyset=2$, cálculo dos K^{-1} respectivos:

$$\emptyset=1 \rightarrow K^{-1} = \frac{d(t)}{Sh' D'm}$$

$$\emptyset=2 \rightarrow K^{-1} = \frac{d(t)}{2Sh' D'm}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K^{-1} = \frac{d_i (1-f)^{1/3}}{Sh' D'm} \quad \wedge \quad \emptyset=1 \\ K^{-1} = \frac{d_i (1-f)^{1/3}}{2Sh' D'm} \quad \wedge \quad \emptyset=2 \end{array} \right.$$

$$\emptyset=1 \Rightarrow K^{-1} = \frac{4,28 \times 10^{-3} (1-f)^{1/3}}{1,979 \times 1,808 \times 10^{-4}} \rightarrow K^{-1} \cong 11,956 \times (1-f)^{1/3}$$

$$\emptyset=2 \Rightarrow K^{-1} = \frac{4,28 \times 10^{-3} (1-f)^{1/3}}{2 \times 1,979 \times 1,808 \times 10^{-4}} \rightarrow K^{-1} \cong 5,978 \times (1-f)^{1/3}$$

TRATAMENTO DO ENSAIO F30

MODELO:

$$K^{-1} = \frac{d(t)}{\varnothing Sh' D'm} \times N$$

$$\varnothing = \frac{d(t)}{K^{-1} Sh' D'm} \quad \wedge \quad d(t) = \text{const e } N=4$$

$$\varnothing = \frac{4,28 \times 10^{-3}}{K^{-1} \times 1,9 \times 1,808 \times 10^{-4}}$$

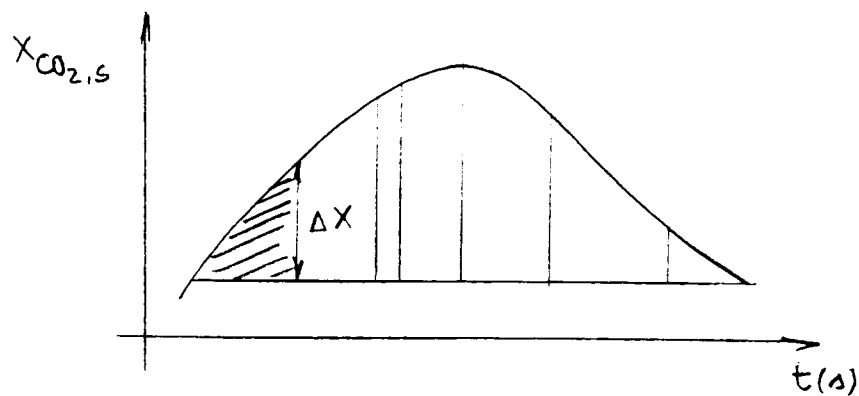
$$\text{e } \frac{1}{K_0} = \pi d^2 \times \frac{(0,21 - \Delta x)}{U.A. \Delta x} \times N$$

f(t)	t(s)	1/Ko (s/n)	Ø
0,125	33	2,15	8,6
0,25	62,1	2,05	8,2
0,375	93	2,02	8,08
0,5	128,9	1,89	7,56
0,625	170,1	2,03	8,12
0,75	225,3	2,36	9,44
0,875	317	2,73	10,92

Quadro VII

EXPERIMENTAL

$$K = \frac{\pi \times d(t) \times (0,21 - \Delta x)}{UA \Delta x}$$



MODELO

$$K = \frac{d(t)}{\varnothing Sh' D'm}$$

$$D'm = 1,808 \times 10^{-4}$$

TRATAMENTO DO ENSAIO F31

MODELO:

$$K^{-1} = \frac{d(t)}{\emptyset \text{ Sh } D' m} \times N$$

$$\emptyset = \frac{4,28 \times 10^{-3}}{K^{-1} \times 1,9 \times 1,808 \times 10^{-4} \times N}$$

$$\text{e } 1/K_0 = \pi \text{ di } x \frac{(0,21 - \Delta x)}{U.A \Delta x} \cdot N$$

	A	B	C	D
1	f(t)	t(s)	1/K ₀ (s/n)	∅
2	0,125	45,3	2,51	10,04
3	0,25	81,8	2,36	9,44
4	0,375	122,5	2,37	9,48
5	0,5	167,8	2,17	8,68
6	0,625	218,6	2,08	8,32
7	0,75	279,8	2,05	8,2
8	0,875	403,4	7,86	15,72

CONCLUSÃO:

Os valores de ∅ resultantes são muito grandes quando comparados com os obtidos na teoria. A opção possível é escolher o maior ∅ conhecido.

Então ∅ = 2, é o modelo de queima seguido

Anexam-se em H

- outros cálculos necessários
- gráficos (R.f) e (f.t) dos ensaios F30 e F31

3 . 2 - PARTÍCULAS COM DIÂMETROS DIFERENTES. MODELO ASSOCIADO

Existe um modelo diferente para as partículas com tamanhos diferentes, em leitos fluidizados de areia. Uma teoria simples foi

desenvolvida com base nos trabalhos de Pinto e Guedes de Carvalho (1990) e Guedes de Carvalho (1991) para explicar a resistência oferecida à transferência de massa de O_2 da fase particulada para a partícula de coque e, tempo total de queima a ela associada. Tendo-se mostrado que essa teoria, se encontra inteiramente de acordo com os trabalhos experimentais.

O problema que se coloca agora é saber qual o comportamento associado à transferência de massa de O_2 para a partícula de coque (R), com uma distribuição diversa de tamanhos (de partículas) e, qual o tempo total de queima nestas condições.

As partículas de coque aqui utilizadas têm diâmetros de 3,0 ; 3,5; 4 e 5,0 mm. Foram agrupadas em lotes que designamos pelo nome do ensaio respectivo. Estes lotes são constituídos por várias combinações de tamanhos, cujo efeito final se estuda por comparação como oportunamente (ponto 3.3) será explicado.

De acordo com a teoria das duas fases, da autoria de Davidson e Harrison (1963) (entretanto já referida neste trabalho) e partindo do princípio de que a fase de emulsão se encontra perfeitamente agitada, posso escrever que :

$$n_j (O_2) = \pi d^2 K_j (C_p - C_s)$$

sendo:

j - índice referido ao lote de partículas com diâmetro d_j

C_s - concentração de O_2 à superfície da partícula

C_p - concentração de O_2 longe da superfície da partícula

K_j - coeficiente de transferência de massa

De acordo com Pinto e Guedes de Carvalho (1990) a oxidação do monóxido de carbono acontece longe da partícula

$$n_j (C) = 2 n_j (O_2)$$

Considerando que $n_T(O_2)$ á superfície das partículas para produzir CO e longe delas para oxidação de CO a CO_2 , se processa segundo

$$n_T(O_2) = \sum_{d=1}^p n_j(O_2) N_j = 2 \sum_{d=1}^p \pi d_j^2 K_j C_p N_j$$

com N_j - nº de partículas com diâmetro d_j

e que a concentração de O_2 no gás envolvente, é a mesma da fase particulada, podemos escrever que

$$n_T(O_2) = UA (C_o - C_p)$$

onde

U - velocidade superficial

A - área do leito

C_o - concentração de oxigénio no interior do leito fluidizado

O conhecimento do número de Sherwood Sh é importante para a avaliação da evolução do diâmetro das partículas no decorrer da combustão. Definindo $Sh' = \frac{K_j d_j}{D'_m}$ e $D'_m = \frac{D_m}{\phi}$ e partindo da dedução duma teoria desenvolvida para transferência de massa para esferas imersas em leito fluidizado, por Coelho e Guedes de Carvalho (1990) que estabelece

$$\frac{Sh'_j}{Emf} = \left[4 + 0,576 (Pe'_{mf})^{0,78} + 1,28 Pe'_{mf} + 0,141 \frac{d}{d_j} (Pe'_{mf})^2 \right]^{1/2}$$

podemos agora encontrar por desenvolvimento duma análise teórica qual a evolução da variação da fracção f da carga queimada ao longo da combustão.

Quanto à resistência à transferência de massa de O₂ da fase densa para a partícula de coque, sabendo que

$$R_e(t) = K_o \pi d_l^2 C_p \times N$$

$$R_e(t) = \Delta X \times UA_p / (RT) = K_o \pi d_l^2 (0,21 p / (RT)) - \Delta x p / (RT) \times N$$

resist. do CO₂ e C da expressão deduzida teoricamente

$$\frac{1}{K_o} = \frac{\pi d_l^2 (0,21 - \Delta x)}{\Delta x \cdot U \cdot A} N$$

Se N=1

$$\frac{1}{K_o} = \frac{\pi d_l^2 (0,21 - \Delta x)}{\Delta x \cdot U \cdot A}$$

$$\text{Como } R_e(t) = k_1 \pi d_1^2 \times C_p \times N_1 + k_2 \pi d_2^2 C_p \times N_2 + \dots$$

$$\text{e } Sh' = \frac{k_1 d_1}{D'_m} \rightarrow k_1 = \frac{Sh'_1 D'_m}{d_1}$$

$$R_e(t) = Sh'_1 D'_m \times \pi d_1 C_p N_1 + \dots$$

$$R_e(t) = \sum \pi Sh_i d_i \cdot D'_m N_i + C_p$$

Finalmente

$$R_t = \frac{1}{\sum_{d=1}^p \pi Sh'_j d_j D'_m N_j}$$

deve notar-se aqui que esta resistência não depende de (U-U_{mf}) mas apenas de U_{mf}

3.2.1- Cálculo de d²(t) e R

$$\text{Para } F_{30} \leq F_{31} : d(t) = 0,00428 \times (1-f)^{1/3}$$

$$\text{Para os restantes } F : d(t) = 0,005 \times (1-f)^{1/3} \quad ; d_i = 5 \text{ mm}$$

$$R = \frac{1/K_o}{\pi d_l^2(t)}$$

3.2.2 Agrupamento dos ensaios F21/22;F23/26;F28/32.Observações

f 21	l/Ko	di ² (t)	$\frac{l/Ko}{\pi di^2 (t)}$
0,125	1,97	2.287x10 ⁻⁵	2,741891018 E+4
0,25	2,35	2.064x10 ⁻⁵	3,624167793 E+4
0,375	2,53	1.828x10 ⁻⁵	4,405492407 E+4
0,5	2,27	1.575x10 ⁻⁵	4,487704391 E+4
0,625	2,76	1.300x10 ⁻⁵	6,757963737 E+4
0,75	2,8	9.921x10 ⁻⁶	8,983647629 E+4
0,875	2,55	6.25x10 ⁻⁶	12,98704336 E+4

f 22	l/Ko	di ² (t)	$\frac{l/Ko}{\pi di^2 (t)}$
0,125	2,26	2.287x10 ⁻⁵	3,145519645 E+4
0,25	2,26	2.064x10 ⁻⁵	3,485369878 E+4
0,375	2,57	1.828x10 ⁻⁵	4,475144461 E+4
0,5	2,22	1.575x10 ⁻⁵	4,486653634 E+4
0,625	2,56	1.300x10 ⁻⁵	5,509209569 E+4
0,75	2,63	9.921x10 ⁻⁶	8,43821188 E+4
0,875	2,12	6.25x10 ⁻⁶	10,79707134 E+4

f 23	l/Ko	di (t)	$\frac{l/Ko}{\pi di^2 (t)}$
0,125	1,63	2.287x10 ⁻⁵	2,268671248 E+4
0,25	1,67	2.064x10 ⁻⁵	2,575472432 E+4
0,375	1,81	1.828x10 ⁻⁵	3,151755438 E+4
0,5	2,03	1.575x10 ⁻⁵	4,102660755 E+4
0,625	2,18	1.300x10 ⁻⁵	5,337811938 E+4
0,75	2,86	9.921x10 ⁻⁶	9,176154364 E+4
0,875		6.25x10 ⁻⁶	

f	l/Ko	di ² (t)	$\frac{l/Ko}{\pi di^2(t)}$
0.125	1.63	2.287x10 ⁻⁵	2.268671248 E+4
0.25	1.67	2.064x10 ⁻⁵	2.575472432 E+4
0.375	1.81	1.828x10 ⁻⁵	3.151755438 E+4
0.5	2.03	1.575x10 ⁻⁵	4.102660755 E+4
0.625	2.18	1.300x10 ⁻⁵	5.337811938 E+4
0.75	2.86	9.921x10 ⁻⁶	9.176154364 E+4
0.875		6.25x10 ⁻⁶	

f24	l/Ko	di ² (t)	$\frac{l/Ko}{\pi di^2(t)}$	f26	l/Ko	di ² (t)	$\frac{l/Ko}{\pi di^2(t)}$
0.125	1.28	2.287x10 ⁻⁵	1.78153325 E+4	0.125	1.55	2.287x10 ⁻⁵	2.1573254 E+4
0.25	1.32	2.064x10 ⁻⁵	2.03570276 E+4	0.25	1.67	2.064x10 ⁻⁵	2.575472432 E+4
0.375	1.39	1.828x10 ⁻⁵	2.420408872 E+4	0.375	1.57	1.828x10 ⁻⁵	2.733843114 E+4
0.5	1.46	1.575x10 ⁻⁵	2.95068212 E+4	0.5	1.66	1.575x10 ⁻⁵	3.35488515 E+4
0.625	1.56	1.300x10 ⁻⁵	3.819718634 E+4	0.625	1.71	1.300x10 ⁻⁵	4.186999272 E+4
0.75	2.02	9.921x10 ⁻⁶	6.481060076 E+4	0.75	1.66	9.921x10 ⁻⁶	5.326019666 E+4
0.875	3.83	6.25x10 ⁻⁶	1.950602983 E+5	0.875	6.99	6.25x10 ⁻⁶	35.59977767 E+4

f28	l/Ko	di ² (t)	$\frac{l/Ko}{\pi di^2(t)}$
0.125	2.5	2.287x10 ⁻⁵	3.479557129 E+4
0.25	3.31	2.064x10 ⁻⁵	3.562479831 E+4
0.375	2.23	1.828x10 ⁻⁵	3.883102003 E+4
0.5	2.16	1.575x10 ⁻⁵	4.365392725 E+4
0.625	2.06	1.300x10 ⁻⁵	5.043987427 E+4
0.75	2.04	9.921x10 ⁻⁶	6.545228987 E+4
0.875	1.71	6.25x10 ⁻⁶	8.708958486 E+4

f ₃₀	1/Ko	di ² (t)	$\frac{1/Ko}{\pi di^2(t)}$
0.125	6.304	1.675815643x10 ⁻⁵	11.9683248 E+4
0.25	6.01	1.512150603x10 ⁻⁵	12.65113681 E+4
0.375	5.92	1.339083163x10 ⁻⁵	14.07227406 E+4
0.5	5.54	1.153986888x10 ⁻⁵	15.28125482 E+4
0.625	5.95	9.525951873x10 ⁻⁶	19.88193776 E+4
0.75	6.92	7.746567935x10 ⁻⁶	28.43458459 E+4
0.875	8	5.731208881x10 ⁻⁶	44.43179689 E+4

f ₃₁	1/Ko	di ² (t)	$\frac{1/Ko}{\pi di^2(t)}$
0,125	7,4	1,675815643x10 ⁻⁵	14,05580123x10 ⁴
0,25	6,9	1,512150603x10 ⁻⁵	14,52459967x10 ⁴
0.375	6,9	1,339083163x10 ⁻⁵	1,640180592x10 ⁵
0,5	6,4	1,153986888x10 ⁻⁵	1,765343517x10 ⁵
0,625	6,1	9,525951873x10 ⁻⁶	2,038316309x10 ⁵
0,75	5,9	7,746567935x10 ⁻⁶	24,24335964 E+4
0,875	31.2	5.731208881x10 ⁻⁶	17.32840079 E+5

f ₃₂	1/Ko	di ² (t)	$\frac{1/Ko}{\pi di^2(t)}$
0,125	2.67	2.287x10 ⁻⁵	3.716167014 E+4
0.25	2.63	2.064x10 ⁻⁵	4.05598353 E+4
0.375	2.41	1.828x10 ⁻⁵	4.196536346 E+4
0.5	2.49	1.575x10 ⁻⁵	5.032327724 E+4
0.625	2.4	1.300x10 ⁻⁵	5.876490206 E+4
0.75	2.32	9.921x10 ⁻⁶	7.44359375 E+4
0.875	2.48	6.25x10 ⁻⁶	12.63053628 E+4

para F30 e F31

$$d(t) = 0.00428 (1-f)^{1.3}$$

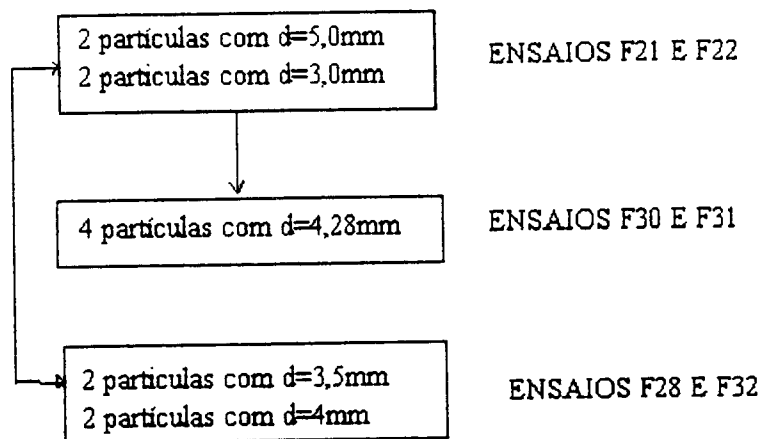
para F restantes

$$d(t) = 0.005 (1-f)^{1.3}$$

Podem encontrar-se de seguida os gráficos representativos do comportamento na queima para os diversos ensaios efectuados: Cada ensaio é designado pela letra F seguida de um número que apenas representa a ordem pela qual estes ensaios foram tendo lugar:

A associação de dois ensaios pretende demonstrar a semelhança e/ou diferença de comportamento final para as mesmas características e condições de operação iniciais.

3.3 - COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS REFERENTES A PARTÍCULAS IGUAIS COM PARTÍCULAS DIFERENTES



Pela observação destes gráficos se pode concluir da diferença de comportamento existente entre os ensaios F30 e F31 e F21, F22, F28 e F32:

Verifica-se uma grande discrepância de valores nos ensaios F30/F31 quando comparados com F21/F22 no que diz respeito às curvas (R, f) . Tal é coerente com a escolha de modelos de queima diferentes. A resistência oferecida à queima é superior em F30/F31:

Quanto às comparações F21/22 com F28/F32 como ensaios do mesmo tipo, seguindo o mesmo modelo de queima, apresentam comportamentos muito semelhantes. É no entanto de notar alguns pormenores. Relativamente ao gráfico (R, f) nota-se um crescimento mais rápido para F28/F32 relativamente a F21/F22 quando $f = 0,750$.

No gráfico (f, t) observa-se que a fracção queimada atinge valores da ordem dos 0.875 para tempos diferentes em F21/F22 e F28/F32 ($\Delta t = 400-250\text{s}$).

4. ANÁLISE DAS INCERTEZAS

4.1 - ASSOCIADAS À CALIBRAÇÃO DO ROTÂMETRO

Sabendo que :

$$\dot{U}_{AR} = \frac{U_{CO2,E} (1 - X_{CO2,S})}{(X_{CO2,S} - X_{CO2,E})}$$

e considerando que $X_{CO2,E} = \text{const}$

$$\text{e } \dot{U} = \frac{V}{t} \quad \text{com } V = \text{const}$$

$$\frac{\partial U_{AR}}{\partial t} = \frac{X_{CO2,S} \cdot \frac{1}{t} - \frac{1}{t^2}}{(X_{CO2,S} - X_{CO2,E})^2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_{AR}}{\partial X_{CO2,S}} &= \frac{-\dot{U}_{CO2,E}(X_{CO2,S} - X_{CO2,E}) - [\dot{U}_{CO2,E}(1 - X_{CO2,S})]}{(X_{CO2,S} - X_{CO2,E})^2} \\ &= \frac{+\dot{U}_{CO2,E}(-X_{CO2,S} + X_{CO2,E} + X_{CO2,S}) - \dot{U}_{CO2,E}}{(X_{CO2,S} - X_{CO2,E})^2} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial U_{AR}}{\partial X_{CO2,S}} = \frac{U_{CO2,E} (X_{CO2,E}^{-1})}{(X_{CO2,S} - X_{CO2,E})^2}$$

$$\text{Resposta} = R(t, X_{CO2,S})$$

$$\omega_{U_{AR}} = \left[\left(\frac{\partial U_{AR}}{\partial t} \right)^2 W_t^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial X_{CO2,S}} \right)^2 W_{X_{CO2,S}}^2 \right]^{1/2}$$

4.2 - ERRO ASSOCIADO AOS U_{AR} DOS ENSAIOS

$$\frac{1}{K_0} = \frac{\pi \times d(t=0) \times (0,21 - \Delta X)}{U \times A \times \Delta X}$$

$$\frac{\partial (1/K_0)}{\partial U} = \frac{-A \Delta X (\pi \times d^2(t=0) \times (0,21 - \Delta X))}{U^2 \times A^2 \times \Delta X^2}$$

$$\frac{\partial (1/K_0)}{\partial U} = \frac{\pi \times d^2(t=0) \times (0,21 - \Delta X)}{U^2 \times A \times \Delta X}$$

$$\frac{\partial (1/K_0)}{\partial X} = \frac{-\pi d^2(t=0) \times (U \times A \times \Delta X) - U \times A \times [\pi \times d^2(t=0) \times (0,21 - \Delta X)]}{(U \times A \times \Delta X)^2}$$

$$= \frac{U \times A \times \pi d^2(t=0) \times [-\Delta X - 0,21 + X]}{U^2 \times A^2 \times \Delta X^2}$$

$$= \frac{-\pi d^2(t=0) \times 0,21}{U \times A \times \Delta X^2}$$

Respostas = $R(U, \Delta X)$; Incerteza associada a $1/K_0$

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial (1/K_0)}{\partial U} \right)^2 \times W_u^2 + \left(\frac{\partial (1/K_0)}{\partial \Delta X} \right)^2 \times W_{\Delta X}^2 \right]^{1/2}$$

$$W_{\Delta X} = 0,0002$$

5 . CONCLUSÕES

Em primeiro lugar deve constatar-se a diferença existente, na resistência à queima por partículas de alto teor em cinza, quando comparadas com partículas de alto teor em carbono.

Em segundo lugar o comportamento na queima de partículas com alto teor em carbono, apresenta diferenças quando nos ensaios se utilizam partículas com um único diâmetro ou quando se utilizam diâmetros diferentes. Tal explica a diferença de modelos de queima seguidos por uns e outros.

Concretamente, pode assinalar-se a maior resistência oferecida à queima, nos ensaios onde as partículas têm o mesmo diâmetro.

Quando o diâmetro das partículas é diferente, nota-se que quando esta diferença é menor, a queima se dá mais rapidamente a partir de determinada altura. O mesmo não acontece quando a diferença de tamanhos aumenta.

Juntando o respectivo modelo teórico aos ensaios realizados, foi possível comprovar e explicar o comportamento na queima destas partículas.

6 - REFERÊNCIAS

"FLUIDISED BED COMBUSTION OF A CHARGE OF COAL WITH A WIDE DISTRIBUTION OF PARTICLE SIZES: de MOTA, PINTO & CAMPOS, CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE, 1993

"FLUIDIZATION ENGINEERING" de DAIZO KUNII da UNIVERSITY of TOKYO e OCTAVE LORENSPIEL da OREGON STATE UNIVERSITY, 1962.

"FLUIDISED BED COMBUSTION OF COAL AND WASTE MATERIALS" de LEE YAUERBAUM, 1977.

" FLUIDIZATION" DE JOHN GRACE (Vancouver, Canada) e JOHN MATSEN (Exxon Research, New Jersey)

Indicações praticas diversas fornecidas pelo Orientador, Engº OSCAR MOTA

ANEXOS

ANEXO A

DIMENSIONAMENTO DO DISTRIBUIDOR

$$T = 950^{\circ} \text{ C} = 1223 \text{ K}$$

PROCEDIMENTO:

i) DETERMINAÇÃO DA QUEDA DE PRESSÃO NECESSÁRIA ATRAVÉS DO DISTRIBUIDOR

$$\Delta p_{d, \min} = m a' \times (0,1 \times \Delta p : 35 \text{ cmH}_2\text{O} : 100 \times \Delta p')$$

ii) CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS E SELECÇÃO DE C_d PELO GRÁFICO FIG12, PAG 88.

$$Re_t = \frac{d_t \rho g \times U_o}{\mu}$$

$$\text{iii) CÁLCULO DE } U_{or} = C_d' \times \left(\frac{2 \times g_c \times \Delta p_d}{\rho g} \right)^{1/2}$$

$$e \frac{\mu_o}{\mu_{or}} < 10\% \leftarrow \left(\frac{\frac{\cancel{\mu_o}}{A_o}}{\frac{\cancel{\mu_{or}}}{A_{or}}} = \frac{A_{or}}{A_o} < 10\% \right)$$

$$\mu_o = \frac{\pi}{4} \times d_o^2 \times U_{or} \times N_{or}$$

$$\text{iv) } N_{or} = \frac{n^{\circ} (\text{orificios})}{\frac{\pi \times d_o^2}{4}}$$

$$\frac{\pi \times d_o^2}{4} = \text{ÁREA DE DISTRIBUIDOR}$$

DIMENSIONAMENTO DO DISTRIBUIDOR

RESULTADOS

$$i) \Delta p = Lmf (1 - Emf) \times (\rho_s - \rho_g) \times \frac{g}{gc}$$

$$Lmf = 20 \text{ cm}$$

$$Emf = 0,4$$

$$\Delta p_d = 0,1 \times \Delta p$$

$$\Delta p = 20 \times 10^{-2} \times (1 - 0,4) \times (2600 - 0,285) \times \frac{9,81}{1} = 3060,4 \quad \text{N/m}^2$$

$$\rho_{g3} = 0,285 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_s = 2600 \text{ Kg/m}^3$$

$$\Delta p_d = 0,1 \times \Delta p = 306,4 \quad \text{N/m}^2$$

$$ii) Ret = \frac{dt \cdot \rho_g \cdot U_o}{\mu} = \frac{80 \times 10^{-3} \times 0,285 \times 2 \times 0,1587}{47,661 \times 10^{-6}} = 151,8$$

$$U_o = U_{mf} \times 2 = 2 \times 0,1587 \text{ m/s}$$

$$dt = d_o = 80 \text{ mm}$$

$$iii) U_{or} = C'd \times \left(\frac{2 \times g \times \Delta p_d}{\rho_g} \right)^{1/2} = 0,7 \times \left(\frac{2 \times 1 \times 306,4}{0,285} \right)^{1/2} = 32,5 \text{ m/s}$$

$$Ret = 3,0 \times 10^2 \Rightarrow C'd = 0,7$$

$$\frac{U_o}{U_{or}} = \frac{2 \times 0,1587}{32,458988} = 0,95\% < 10\%$$

$$iv) Nor = \frac{u_o \times 4 \times 1}{u_{or} \times \pi \times d_{or}^2} = \frac{1,24 \times 10^2}{d_{or}^2}$$

dor (cm)	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
Nor (furos/cm ²)	4,96	1,24	0,31	0,138	0,0078

Seleccionando orifícios demasiadamente pequenos existe o risco de entupimento. Por outro lado aqueles que são muito largos podem originar uma distribuição irregular do gás:

Dadas as considerações aqui feitas a selecção mais conveniente será :

$$d = 0.2 \text{ cm}$$

$$N_{or} = 0.31 / \text{cm}^2$$

CONSTRUÇÃO DO GRÁFICO REPRESENTATIVO DA VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO PARA DISTRUBUIDOR COM DT=8CM

Utilizando os rotâmetros 6A - 150 - g e 6A - 150 - s e com base nos seus gráficos (posição rotâm / $\dot{U}(\text{cm}^3/\text{s})$) construi-se uma tabela de velocidades por variação da posição dos rotâmetros, para valores compreendidos entre 15 e 70

$$P_{\text{CALIBRAÇÃO}} = 760 \text{ mmHg}$$

$$T_{\text{CALIBRAÇÃO}} = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$$

$$P_{\text{TRABALHO}} = 760 \text{ mmHg}$$

$$T_{\text{TRABALHO}} = 950^\circ\text{C} = 1223 \text{ K}$$

$$U(\text{cm/s}) = \frac{\dot{U}(t=20^\circ\text{C})}{A} \times \frac{P_{\text{CALIBRAÇÃO}}}{P_{\text{TRABALHO}}} \times \frac{T_{\text{TRABALHO}}}{T_{\text{CALIBRAÇÃO}}}$$

$$A = 53.68 \text{ CM}^2$$

ROTÂMETRO 6A - 150 S

POSIÇÃO	$\dot{U}$ (cm ³ /s)	U (cm/s)	ΔP (mmH ₂ O)
70	865	67,26	290
60	755	—	280
50	645	50,15	270
35	465	36,94	265
30	420	32,66	265
25	365	28,38	265
20	310	24,11	255
15	255	19,83	238

ROTÂMETRO 6A - 150 - G

POSIÇÃO	$\dot{U}$ (cm ³ /s)	U (cm/s)	ΔP (mmH ₂ O)
50	255	19,83	259
45	283	22,00	259
40	225	17,5	255
35	195	15,16	235
30	170	13,22	210
25	145	11,27	183
20	110	8,55	157
15	95	7,39	126

Os gráficos seguintes apresentam as curvas $U = f(\Delta p)$ resultantes destas observações experimentais.

Obs:- Foram desprezados os valores relativos às posições 70,60 e 50 do rotâmetro 6A - 150 -S, dado que houve uma grande variação de temperatura

- Verificou-se que um aumento da velocidade originou uma maior agitação do leito:

$P_{red} = 1,0 \text{ bar}$

$P_{abs} = 2,0 \text{ bar}$

100

100

500

800

700

600

500

400

300

200

100

0

6A-150-5

6A-150-6

10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

CALCULO DA VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO

$$\frac{1,75}{\phi_s \times E^{3mf}} \times \left(\frac{dp \times U_{mf} \times \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150 \times (1 - E_{mf})}{\phi_s^2 \times E^{3mf}} \times \left(\frac{dp \times U_{mf} \times \rho_g}{\mu} \right) =$$

$$= \frac{d^3 p \times \rho_g \times (\rho_s - \rho_g) \times g}{\mu^2}$$

$$E_{mf} = \frac{V_{poros}}{V_{total}} = 0,4$$

$$dp = 0,650 \text{ mm}$$

$$\phi_s = 1,0$$

$$\rho_s = 2600 \text{ Kg/m}^3$$

$$dt = 8 \text{ cm} \rightarrow A = 0,005368 \text{ m}^2 = 53,68 \text{ cm}^2$$

$$P = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2$$

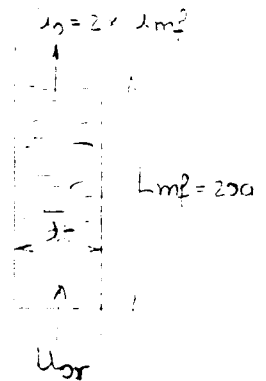
$$T_i = \begin{cases} 20^\circ\text{C} = 293\text{K} \\ 900^\circ\text{C} = 1173\text{K} \\ 950^\circ\text{C} = 1223\text{K} \\ 1000^\circ\text{C} = 1273\text{K} \end{cases}$$

$i=1,4$

$$\rho_g = \frac{P}{R_{AR} \times T} \quad \Leftrightarrow$$

$$\rho_g = \frac{348,43}{T}$$

$$R_{AR} = 287 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$$



CÁLCULO DA VELOCIDADE DE FLUIDUZAÇÃO -RESULTADOS OBTIDOS

$$T1 = 293K \quad \rho_{1g} = 1.2 \text{ kg/m}^3 \quad \mu_1 = 10.240 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$$

$$T2 = 1173K \quad \rho_{2g} = 0.3 \text{ kg/m}^3 \quad \mu_2 = 46.879 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$$

$$T3 = 1223K \quad \rho_{3g} = 0.285 \text{ kg/m}^3 \quad \mu_3 = 47.661 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$$

$$T4 = 1273K \quad \rho_{4g} = 0.274 \text{ kg/m}^3 \quad \mu_4 = 48.445 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$$

U_{mf}

$$\frac{1.75}{1 \times 0.43} \times \left(\frac{0.650 \times 0.285}{47.661 \times 10^{-6}} \right)^2 U_{mf}^2 + \frac{150 \times (1-0.4)}{12 \times 0.43} \times \left(\frac{0.650 \times 0.285}{47.66 \times 10^{-6}} \right) U_{mf} =$$

$$= \frac{0.650^3 \times 0.285 \times (2600 - 0.285) \times 9.8}{(47.661 \times 10^{-6})^2}$$

$$413.0933539 \times U_{mf}^2 + 5465.84865 \times U_{mf} - 877.83 = 0$$

$$U_{mf} = 0.158699 \text{ m/s}$$

$$U_{mf} \cong 16 \text{ cm/s}$$

CÁLCULO DE VELOCIDADE DE FLUIDIZAÇÃO -RESTANTES RESULTADOS

$$U_{mf1} = 44.9 \text{ cm/s}$$

$$U_{mf2} = 16.12 \text{ cm/s}$$

$$U_{mf4} = 15.62 \text{ cm/s}$$

$$U_{mf3} = 15.87 \text{ cm/s (Já calculado atrás)}$$

ANEXO B

CALIBRAÇÃO DO ANALIZADOR DE CO₂

1) Introduz-se um caudal qualquer de N₂ (azoto) no analisador e acerta-se o zero no manipulo da esquerda

2) Mede-se um caudal conhecido de CO₂, $\dot{U}_{CO_2}$, no medidor de bolhas (água com sabão):

$$V = 10 \text{ cm}^3$$

$$t_1 = 7,95 \text{ s}$$

$$t_2 = 7,85 \text{ s} \quad \left. \vphantom{t_2} \right\} \quad \bar{t} = 7,867 \text{ s}$$

$$t_3 = 7,80 \text{ s}$$

$$\dot{U}_{CO_2} = \frac{10 \text{ cm}^3}{t} = 1,271 \text{ cm}^3/\text{s}$$

3) Mede-se um caudal conhecido de N₂ num rodâmetro 2C-150-S

POS 70

$$P_{\text{CALIB (relativa)}} = 1 \text{ bar}$$

$$\left. \vphantom{P_{\text{CALIB}}} \right\} \quad \dot{U}_{N_2} = 34,887 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$T = 15^\circ\text{C} = 288 \text{ K}$$

$$p_{\text{DIA}} = 767,8 \text{ mmHg}$$

$$T_{\text{DIA}} = 294 \text{ K}$$

$$\dot{U}_{N_2} = 34,887 \times \frac{760}{p_{\text{DIA}}} \times \frac{T_d}{288} = 35,252 \text{ cm}^3/\text{s}$$

4) Mistura-se $\dot{U}_{CO_2}$ e $\dot{U}_{N_2}$, e a concentração molar de CO₂ relativamente ao total de moles é dada pela fracção molar:

$$X_{CO_2} = \frac{\dot{U}_{CO_2}}{\dot{U}_{CO_2} + \dot{U}_{N_2}} = \frac{\dot{n}_{CO_2}}{\dot{n}_{\text{total}}} = 3,48\%$$

Escolhe-se uma escala adequada ao analizador por forma a obter-se este valor de X_{co2} em percentagem, mexendo-se para tal no manipulo da direita do analizador

CALIBRAÇÃO DO ROTÂMETRO

Rotâmetro → 6A -150-S

i) Pressão de calibração = 1 bar relativo → 2 bar absoluto

ii) Medir || Pressão ambiente = 758,3 mmHg
 || T ambiente = 20°C

$$\dot{V}_{ar, entrada} = \frac{\dot{V}_{CO_2E}}{\frac{(1-X_{CO_2E})}{(1-X_{CO_2S})} \times X_{CO_2S} - X_{CO_2E}}$$

$$X_{CO_2,E} = 0,05\% = 0,0005 \quad (\text{ar atmosférico})$$

$$V_{CO_2,E} = \frac{10 \text{ cm}^3}{\bar{t}} = \frac{10}{4} = 2,5 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$X_{CO_2,E} = 0,005\% = 0,0005 \quad (\text{AR ATMOSFÉRICO})$$

$$\left. \begin{array}{l} t_1 \rightarrow 4,0 \\ t_2 \rightarrow 4,1 \\ t_3 \rightarrow 4,1 \\ t_4 \rightarrow 4,0 \end{array} \right\} \bar{t} = 4s$$

Substituindo :

$$\dot{V}_{AR} = 0,25 \times \frac{1}{\frac{0,9995}{(1 - X_{CO_2,S})} \times X_{CO_2,S} - 0,0005}$$

POS ROTÂMETRO	10	20	30	40	50
X _{CO2.SAÍDA} [%]	1,28	0,88	0,645	0,54	0,43
$\dot{V}$ AR.ENTRADA [cm ³ /s]	200,650	298,554	417,458	507,449	655,066

POS ROTÂMETRO	60	70	80	90
X _{CO2.SAÍDA} [%]	0,38	0,33	0,3	0,28
$\dot{V}$ AR.ENTRADA [cm ³ /s]	754,697	889,911	997,000	1083,913

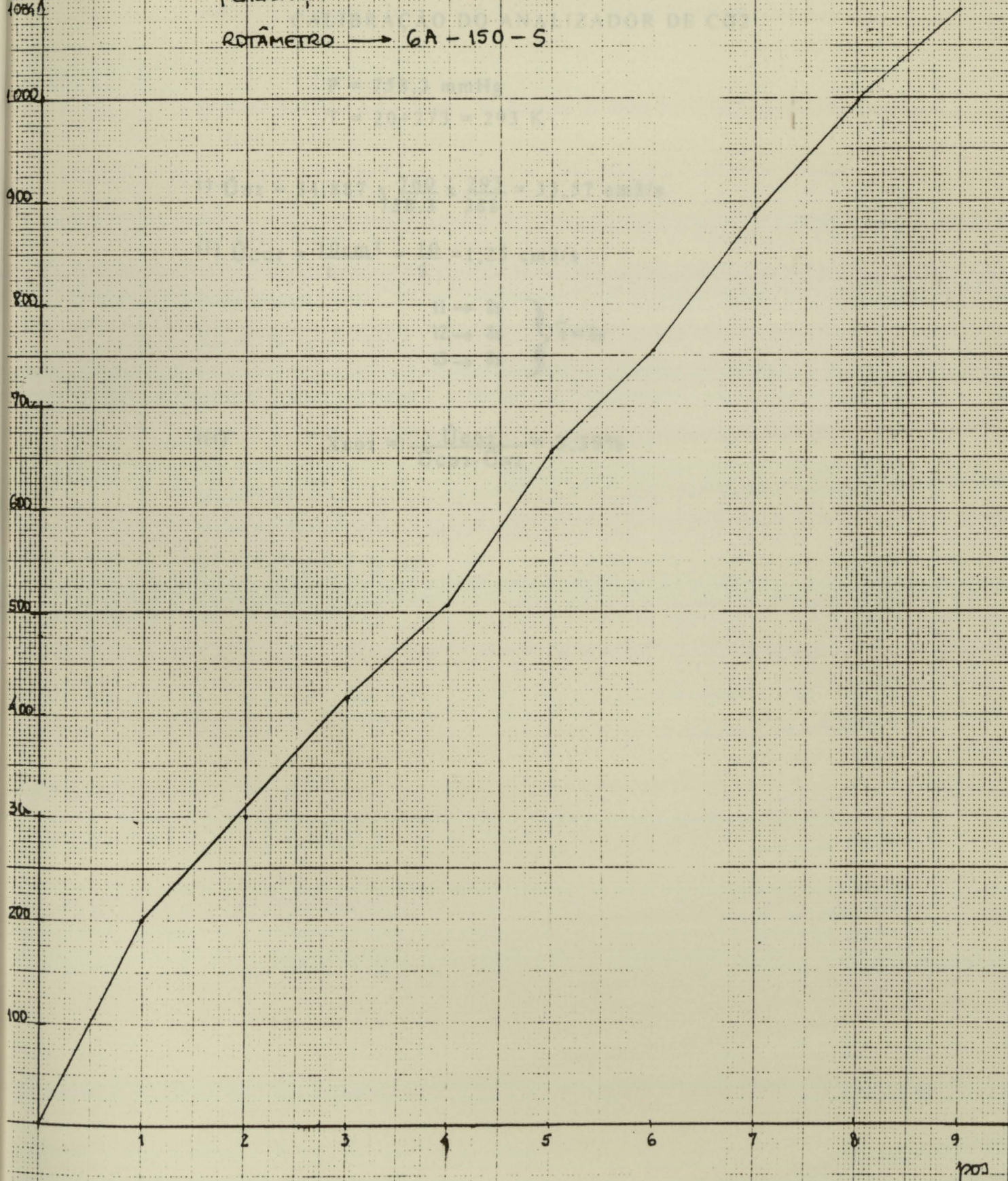
Estes valores tabelados encontram-se representados na curva $\dot{U}=f(\text{pos})$ que em seguida se anexa.

$Li [cm^3/s]$ P.T.N. $\begin{cases} p = 760 \text{ mmHg} \\ T = 15^\circ C \end{cases}$

$Li [cm^3/s]$
1000

Pressurização = 1 bar relativo

ROTÂMETRO $\rightarrow$ GA-150-S



CALIBRAÇÃO DO ANALIZADOR DE CO₂

$$P = 758,3 \text{ mmHg}$$

$$T = 20 + 273 = 293 \text{ K}$$

$$\text{i) } \dot{U}_{N_2} = 34,887 \times \frac{760}{758,3} \times \frac{293}{288} = 35,57 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$\text{ii) } \dot{U}_{CO_2} = \frac{10 \text{ cm}^3}{t} = \frac{10}{8} = 1,25 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$\left. \begin{array}{l} t_1 \rightarrow 8s \\ t_2 \rightarrow 8s \\ t_3 \rightarrow 8s \end{array} \right\} \bar{t} = 8s$$

$$\text{iii) } X_{CO_2} = \frac{\dot{U}_{CO_2}}{\dot{U}_{CO_2} + \dot{U}_{N_2}} = 3,39\%$$

PARÂMETROS DO CONTROLADOR
VALORES OBTIDOS COM CORRECÇÕES/STANDARD 810

i) Rotâmetro : 6A - 150 - S (esfera de aço)

Posição 30

Pressão = 1 bar (relativa) = 2bar absoluta de calibração

ii) Resultados:

$$v = 10 \text{ mm/h}$$

$$Pb = 2\% = \frac{25}{1250} \times 100$$

$$t_i = 5 \times 360 = 1800 \text{ s}$$

$$t_d = T = 360 \text{ s} \rightarrow 300 \text{ s}$$

$$A_p = 2$$

$$H_c = 10 \text{ s}$$

$$HL = 24 \%$$

$$47 \times 360 = 4,7 \text{ horas}$$

OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR DE TEMPERATURA QUE CONTROLA TERMOPAR

I) O sistema cuja temperatura se pretende controlar caracteriza-se da seguinte forma:

- Leito de areia com altura de $H = 20\text{cm}$
- Contido em tubo refractário de diâmetro $D_t = 8\text{cm}$
- Diâmetro médio das partículas de areia $d = 0,650\text{ mm}$

ii) Procedimento:

- Injecta-se um caudal conhecido de ar que passa assim através do leito. Um termopar acoplado a um controlador de temperatura mede a temperatura do leito, que vai sendo continuamente registada num registador

iii) Parâmetros do controlador recorrendo ao respectivo manual:

- Condições iniciais:

$$P_b = 3$$

$$t_i = 60\text{s}$$

$$t_d = 60\text{s}$$

$$A_p = 2$$

$$H_c = 10\text{s}$$

$$H_l = 24\%$$

• Considerar que o set - point pretendido é de 300°C

• • Ter o cuidado de nunca colocar o rotâmetro H_l acima de

50%

ANEXO C

DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO CARVÃO

3 Amostras

Metodologia

1) Determina-se o piconómetro :

i) Pesa-se o piconómetro vazio

$$m_{\text{Pic.vazio}} = 13,2576 \text{ g}$$

ii) Enche-se o piconómetro com água destilada e volta a pesar-se o piconómetro e a medir a temperatura de água destilada

$$m_{(\text{pic}+\text{H}_2\text{O})} = 37,4446 \text{ g}$$

$$\bullet \bullet \left[\begin{array}{l} V = 1,05 \text{ mV} \rightarrow \text{Termopar tipo J (IRON - CONSTANTAN)} \\ T = \underline{20,1}^{\circ}\text{C} \end{array} \right.$$

$$P_A = \rho_{\text{Hg}} g h =$$

iii) O volume do piconómetro obtem-se do seguinte modo :

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = m_{(\text{PIC}+\text{H}_2\text{O})} - m_{\text{PIC:VAZIO}} = 24,187 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

Com a temperatura determinada para a água e a pressão ambiente, recorre-se às tabelas de valor de água, obtendo-se o valor de $\rho_{\text{H}_2\text{O}}[\text{kg/m}^3]$

$$\left. \begin{array}{l} \text{para } T = 20,1^{\circ}\text{C} \\ p = 766,9 \text{ mmHg} \end{array} \right\} \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 974,0 \text{ kg/m}^3$$

Finalmente

$$V_{\text{PICONOMETRO}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} = 2,48326 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

2) Determina-se a massa específica do kerosene

i) Enche-se o piconómetro com kerosene

$$m_{\text{PIC-QUEROSENE}} = 32,6093 \text{ g}$$

i) A densidade do kerosene determina-se do seguinte modo:

$$\rho_{\text{KER}} = \frac{m_{\text{(PIC-KER)}} - m_{\text{PICVAZIO}}}{V_{\text{PIC}}}$$

$$\rho_{\text{KER}} = \frac{32,3093 - 13,2576}{2,48328 \times 10^{-2}} = 779,286 \text{ kg/m}^3$$

3) Determina-se finalmente a massa específica do carvão:

i) Enche-se o piconómetro com querosene e introduz-se a partícula de carvão, previamente pesada

$$m_1 (\text{partícula com alto teor em carbono}) = 0,0232 \text{ g}$$

$$m_2 (\text{partícula com alto teor em cinza}) = 0,0675 \text{ g}$$

$$m_3 (\text{partícula com alto teor em cinza}) = 0,0720 \text{ g}$$

ii) Pesa-se o conjunto $m_{\text{(PIC-KEROSENE+PART.)}}$

$$m_1 (\text{PIC-KER+PART}) = 32,6125 \text{ g}$$

$$m_2 (\text{PIC-KER+PART}) = 32,6416 \text{ g}$$

$$m_3 (\text{PIC-KER+PART}) = 32,6628 \text{ g}$$

iii) Determina-se o volume da partícula através da expressão seguinte

$$V_{\text{PIC}} = V_{\text{KER}} + V_{\text{PART}}$$

$$V_{\text{PART.}} = V_{\text{PIC}} - \left(\frac{m_{\text{PIC-KER+PART}} - m_{\text{PICVAZIO}} - m_{\text{PART}}}{\rho_{\text{KEROSENE}}} \right)$$

$$V_1 = 2,566134 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$V_2 = 4,5166375 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$V_3 = 2,37365019 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

iv) Determinação da massa específica do carvão:

$$\rho_{\text{PART.}} = \frac{m_{\text{PARTÍCULA}}}{V_{\text{PARTÍCULA}}}$$

$$\rho_1 = 904,084 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_2 = 1494,475 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_3 = 3033,303 \text{ kg/m}^3$$

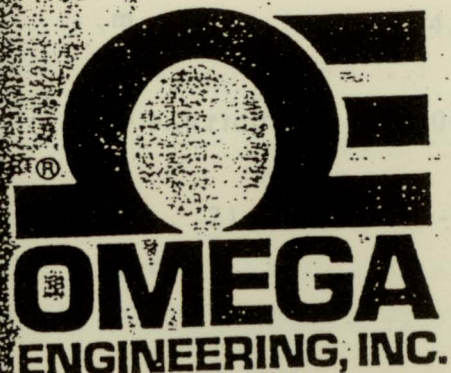
Obs: Utilizou-se o kerosene por forma a garantir a igualdade

$$V_{\text{PICONÓMETRO}} = V_{\text{KEROSENE}} + V_{\text{PARTÍCULA}}$$

isto porque o kerosene ocupou todos os espaços (vazios, ocios) contidos na partícula de carvão

TABLE I

TYPE J

New Reference Tables
Supersedes N.B.S.
Circular #561Iron Vs.
Copper-
Nickel
(Iron-Constantan)Temperature in Degrees C
Reference Junction at 0°C


OMEGA
ENGINEERING, INC.

An OMEGA Group Company

One Omega Drive, Box 4047, Stamford, CT 06907
(203) 359-1660 Telex 996404 Cable OMEGA

DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS												
-210	-8.096											-210
-200	-7.890	-7.912	-7.934	-7.955	-7.976	-7.996	-8.017	-8.037	-8.057	-8.076	-8.096	-200
-190	-7.659	-7.683	-7.707	-7.731	-7.755	-7.778	-7.801	-7.824	-7.846	-7.868	-7.890	-190
-180	-7.402	-7.429	-7.455	-7.482	-7.508	-7.533	-7.559	-7.584	-7.609	-7.634	-7.659	-180
-170	-7.122	-7.151	-7.180	-7.209	-7.237	-7.265	-7.293	-7.321	-7.348	-7.375	-7.402	-170
-160	-6.821	-6.852	-6.883	-6.914	-6.944	-6.974	-7.004	-7.034	-7.064	-7.093	-7.122	-160
-150	-6.499	-6.532	-6.565	-6.598	-6.630	-6.663	-6.695	-6.727	-6.758	-6.790	-6.821	-150
-140	-6.159	-6.194	-6.228	-6.263	-6.297	-6.331	-6.365	-6.399	-6.433	-6.466	-6.499	-140
-130	-5.801	-5.837	-5.874	-5.910	-5.946	-5.982	-6.018	-6.053	-6.089	-6.124	-6.159	-130
-120	-5.426	-5.464	-5.502	-5.540	-5.578	-5.615	-5.653	-5.690	-5.727	-5.764	-5.801	-120
-110	-5.036	-5.076	-5.115	-5.155	-5.194	-5.233	-5.272	-5.311	-5.349	-5.388	-5.426	-110
-100	-4.632	-4.673	-4.714	-4.755	-4.795	-4.836	-4.876	-4.916	-4.956	-4.996	-5.036	-100
-90	-4.215	-4.257	-4.299	-4.341	-4.383	-4.425	-4.467	-4.508	-4.550	-4.591	-4.632	-90
-80	-3.785	-3.829	-3.872	-3.915	-3.958	-4.001	-4.044	-4.087	-4.130	-4.172	-4.215	-80
-70	-3.344	-3.389	-3.433	-3.478	-3.522	-3.566	-3.610	-3.654	-3.698	-3.742	-3.785	-70
-60	-2.892	-2.938	-2.984	-3.029	-3.074	-3.119	-3.163	-3.207	-3.251	-3.295	-3.339	-60
-50	-2.431	-2.478	-2.524	-2.570	-2.617	-2.663	-2.709	-2.755	-2.801	-2.847	-2.892	-50
-40	-1.960	-2.008	-2.055	-2.102	-2.150	-2.197	-2.244	-2.291	-2.338	-2.384	-2.431	-40
-30	-1.481	-1.530	-1.578	-1.626	-1.674	-1.722	-1.770	-1.818	-1.865	-1.913	-1.960	-30
-20	-0.995	-1.044	-1.093	-1.141	-1.190	-1.238	-1.286	-1.334	-1.381	-1.429	-1.476	-20
-10	-0.501	-0.550	-0.600	-0.649	-0.698	-0.746	-0.794	-0.842	-0.890	-0.938	-0.985	-10
0	0.000	-0.059	-0.121	-0.181	-0.241	-0.301	-0.361	-0.421	-0.481	-0.541	-0.601	0
DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405	0.456	0.507	0
10	0.557	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.813	0.864	0.915	0.966	1.017	10
20	1.018	1.070	1.122	1.174	1.225	1.277	1.329	1.381	1.432	1.484	1.535	20
30	1.536	1.589	1.640	1.693	1.745	1.797	1.849	1.901	1.954	2.006	2.058	30
40	2.058	2.111	2.163	2.216	2.268	2.321	2.374	2.426	2.479	2.532	2.585	40
50	2.585	2.629	2.651	2.704	2.756	2.809	2.861	2.914	2.967	3.020	3.073	50
60	3.073	3.118	3.171	3.224	3.277	3.330	3.383	3.436	3.489	3.542	3.595	60
70	3.595	3.640	3.693	3.746	3.799	3.852	3.905	3.958	4.011	4.064	4.117	70
80	4.117	4.162	4.215	4.268	4.321	4.374	4.427	4.480	4.533	4.586	4.639	80
90	4.639	4.684	4.737	4.790	4.843	4.896	4.949	5.002	5.055	5.108	5.161	90
100	5.161	5.206	5.259	5.312	5.365	5.418	5.471	5.524	5.577	5.630	5.683	100
110	5.683	5.728	5.781	5.834	5.887	5.940	5.993	6.046	6.099	6.152	6.205	110
120	6.205	6.249	6.302	6.355	6.408	6.461	6.514	6.567	6.620	6.673	6.726	120
130	6.726	6.769	6.822	6.875	6.928	6.981	7.034	7.087	7.140	7.193	7.246	130
140	7.246	7.289	7.342	7.395	7.448	7.501	7.554	7.607	7.660	7.713	7.766	140
150	7.766	7.809	7.862	7.915	7.968	8.021	8.074	8.127	8.180	8.233	8.286	150
160	8.286	8.329	8.382	8.435	8.488	8.541	8.594	8.647	8.700	8.753	8.806	160
170	8.806	8.849	8.902	8.955	9.008	9.061	9.114	9.167	9.220	9.273	9.326	170
180	9.326	9.369	9.422	9.475	9.528	9.581	9.634	9.687	9.740	9.793	9.846	180
190	9.846	9.889	9.942	9.995	10.048	10.101	10.154	10.207	10.260	10.313	10.366	190
200	10.366	10.409	10.462	10.515	10.568	10.621	10.674	10.727	10.780	10.833	10.886	200
210	10.886	10.929	10.982	11.035	11.088	11.141	11.194	11.247	11.300	11.353	11.406	210
220	11.406	11.449	11.502	11.555	11.608	11.661	11.714	11.767	11.820	11.873	11.926	220
230	11.926	11.969	12.022	12.075	12.128	12.181	12.234	12.287	12.340	12.393	12.446	230
240	12.446	12.489	12.542	12.595	12.648	12.701	12.754	12.807	12.860	12.913	12.966	240
250	12.966	13.009	13.062	13.115	13.168	13.221	13.274	13.327	13.380	13.433	13.486	250
260	13.486	13.529	13.582	13.635	13.688	13.741	13.794	13.847	13.900	13.953	14.006	260
270	14.006	14.049	14.102	14.155	14.208	14.261	14.314	14.367	14.420	14.473	14.526	270
280	14.526	14.569	14.622	14.675	14.728	14.781	14.834	14.887	14.940	14.993	15.046	280
290	15.046	15.089	15.142	15.195	15.248	15.301	15.354	15.407	15.460	15.513	15.566	290
300	15.566	15.609	15.662	15.715	15.768	15.821	15.874	15.927	15.980	16.033	16.086	300
310	16.086	16.129	16.182	16.235	16.288	16.341	16.394	16.447	16.500	16.553	16.606	310
320	16.606	16.649	16.702	16.755	16.808	16.861	16.914	16.967	17.020	17.073	17.126	320
330	17.126	17.169	17.222	17.275	17.328	17.381	17.434	17.487	17.540	17.593	17.646	330
340	17.646	17.689	17.742	17.795	17.848	17.901	17.954	18.007	18.060	18.113	18.166	340
350	18.166	18.209	18.262	18.315	18.368	18.421	18.474	18.527	18.580	18.633	18.686	350
360	18.686	18.729	18.782	18.835	18.888	18.941	18.994	19.047	19.100	19.153	19.206	360
370	19.206	19.249	19.302	19.355	19.408	19.461	19.514	19.567	19.620	19.673	19.726	370
380	19.726	19.769	19.822	19.875	19.928	19.981	20.034	20.087	20.140	20.193	20.246	380
390	20.246	20.289	20.342	20.395	20.448	20.501	20.554	20.607	20.660	20.713	20.766	390
400	20.766	20.809	20.862	20.915	20.968	21.021	21.074	21.127	21.180	21.233	21.286	400
410	21.286	21.329	21.382	21.435	21.488	21.541	21.594	21.647	21.700	21.753	21.806	410
420	21.806	21.849	21.902	21.955	22.008	22.061	22.114	22.167	22.220	22.273	22.326	420
430	22.326	22.369	22.422	22.475	22.528	22.581	22.634	22.687	22.740	22.793	22.846	430
440	22.846	22.889	22.942	22.995	23.048	23.101	23.154	23.207	23.260	23.313	23.366	440
450	23.366	23.409	23.462	23.515	23.568	23.621	23.674	23.727	23.780	23.833	23.886	450
460	23.886	23.929	23.982	24.035	24.088	24.141	24.194	24.247	24.300	24.353	24.406	460
470	24.406	24.449	24.502	24.555	24.608	24.661	24.714	24.767	24.820	24.873	24.926	470
480	24.926	24.969	25.022	25.075	25.128	25.181	25.234	25.287	25.340	25.393	25.446	480
490	25.446	25.489	25.542	25.595	25.648	25.701	25.754	25.807	25.860	25.913	25.966	490
500	25.966	26.009	26.062	26.115	26.168	26.221	26.274	26.327	26.380	26.433	26.486	500
510	26.486	26.529	26.582	26.635	26.688	26.741	26.794	26.847	26.900	26.953	27.006	510
520	27.006	27.049	27.102	27.155	27.208	27.261	27.314	27.367	27.420	27.473	27.526	520
530	27.526	27.569	27.622	27.675	27.728	27.781	27.834	27.887	27.940	27.993	28.046	530
540	28.046	28.089	28.142	28.195	28.248	28.301	28.354	28.407	28.460	28.513	28.566	540
550	28.566	28.609	28.662	28.715	28.768	28.821	28.874	28.927	28.980	29.033	29.086	550
560	29.086	29.129	29.182	29.235	29.288	29.341	29.394	29.447	29.500	29.553	29.606	560
570	29.606	29.649	29.702	29.755	29.808	29.861	29.914	29.967	30.020	30.073	30.126	570
580	30.126	30.169	30.222	30.275	30.328	30.381	30.434	30.487	30.540	30.593	30.646	580
590	30.646	30.689	30.742	30.795	30.848	30.901	30.954	31.007	31			

DETERMINAÇÃO DA FRACÇÃO DE CARBONO FIXO

6 Amostras: 3 com teor elevado em cinza ($\varnothing = 4\text{mm}$)

3 com teor elevado em carbono ($\varnothing = 3\text{mm}$)

Metodologia:

1) Pesam-se as amostras, depois de retirado o vapor de água numa mufla a 105°C durante 10 a 15 min :

ELEVADO TEOR EM CINZA	ELEVADO TEOR EM CARBONO
1	2
$m_{\text{CAD}} + m_{\text{PART}} = 21,0145 \text{ g}$	$m_{\text{CAD}} + m_{\text{PART}} = 25,6664$
g	
$m_{\text{CAD}} = 20,9445 \text{ g}$	$m_{\text{CAD}} = 25,6447$
g	
$m_{\text{PARTÍCULA}} = 0,0700 \text{ g}$	$m_{\text{PARTÍCULA}} = 0,0217 \text{ g}$
3	4
$m_{\text{CAD}} + m_{\text{PART}} = 25,8090 \text{ g}$	$m_{\text{CAD}} + m_{\text{PART}} = 24,6979$
g	
$m_{\text{CAD}} = 25,7368 \text{ g}$	$m_{\text{CAD}} = 24,6774$
g	
$m_{\text{PARTÍCULA}} = 0,0722 \text{ g}$	$m_{\text{PARTÍCULA}} = 0,0205 \text{ g}$
5	6
$m_{\text{CAD}} + m_{\text{PART}} = 14,9900 \text{ g}$	$m_{\text{CAD}} + m_{\text{PART}} = 15,0117$
g	
$m_{\text{CAD}} = 14,9252 \text{ g}$	$m_{\text{CAD}} = 14,9911$
g	
$m_{\text{PARTÍCULA}} = 0,0648 \text{ g}$	$m_{\text{PARTÍCULA}} = 0,0206 \text{ g}$

2) Introduzem-se as amostras numa mufla a 950°C durante 3 horas:

3) Repete-se o ponto 1)

$$\begin{array}{l} 1 \\ m_{CAD} + m_{CINZA} = 20,9575 \text{ g} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} g \\ m_{CAD} = 20,9445 \text{ g} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} g \\ m_{CINZA} = 0,0130 \text{ g} \end{array}$$

g

$$\begin{array}{l} 3 \\ m_{CAD} + m_{CINZA} = 25,7776 \text{ g} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} g \\ m_{CAD} = 25,7368 \text{ g} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} g \\ m_{CINZA} = 0,0408 \text{ g} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} 5 \\ m_{CAD} + m_{CINZA} = 14,9635 \text{ g} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} g \\ m_{CAD} = 14,9252 \text{ g} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} g \\ m_{CINZA} = 0,0383 \text{ g} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} 2 \\ m_{CAD} + m_{CINZA} = 25,6481 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} m_{CAD} = 25,6447 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} m_{CINZA} = 0,0034 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} 4 \\ m_{CAD} + m_{CINZA} = 24,6801 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} m_{CAD} = 24,6774 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} m_{CINZA} = 0,0027 \text{ g} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} 6 \\ m_{CAD} + m_{CINZA} = 14,9944 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} m_{CAD} = 14,9911 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} m_{CINZA} = 0,0033 \text{ g} \end{array}$$

Resultados

m1) = massa de carbono fixo + cinza

m3) = massa de cinza

Obs) O carbono fixo queima todo na mufla a 950°C durante

3 horas

$$FCF (\text{Fracção de carbono fixo}) = \frac{m1) - m3)}{m1)} \%$$

1 - FCF = 81,4% (Cinza mole)

3 - FCF = 43,5% (Cinza dura)

5 - FCF = 41% (Cinza dura)

2 - FCF = 84,33 %

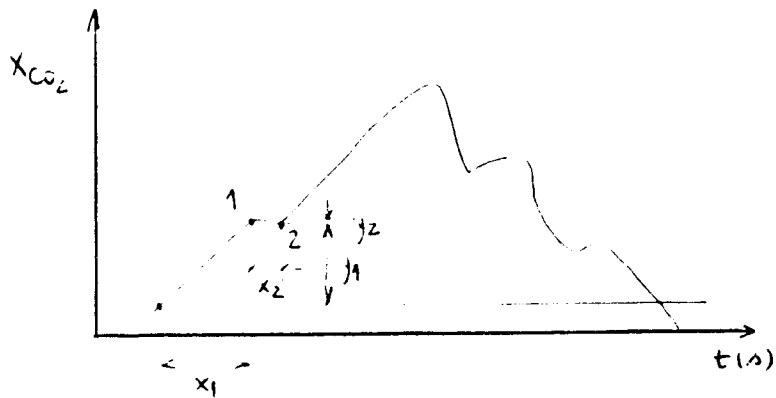
4 - FCF = 86,83%

6 - FCF = 84%

ANEXO D

INTEGRAÇÃO DAS CURVAS X_{CO_2} -t

Cálculo de FTQ para F3, F4, F5, F6 e F7



$$t \rightarrow U = \frac{10 \text{ mm}}{60 \text{ s}} \rightarrow 1 \text{ mm} = 6 \text{ s}$$

$$X \rightarrow 250 \text{ mm} \rightarrow 0,02$$

$$1 \text{ mm} \rightarrow 1 \text{ m} = 8 \times 10^{-5}$$

$$F = 6 \times 8 \times 10^{-5} = 48 \times 10^{-5}$$

$$FTQ = \frac{\int x \, dt \times 12 \times P \times U \times A}{m_{\text{CARGA}} \times FCF \times \bar{R} \times T}$$

$$\int x \, dt = ?$$

$$FCF = 0,573$$

$$\bar{R} = 8314 \text{ J/Kmol K}$$

$$T = 1241 \text{ K}$$

$$A = 0,001368 \text{ m}^2$$

$$P = \text{Pa} = 1,0205 \times 10^5$$

$$U = 23,612 \text{ cm/s}$$

$$m - \text{Kg}$$

COMPILAÇÃO DOS DADOS RETIRADOS DAS CURVAS QUE
SEGUIDAMENTE SE APRESENTAM COM OBJECTIVO DO CÁLCULO
DE $\int x \, dt$

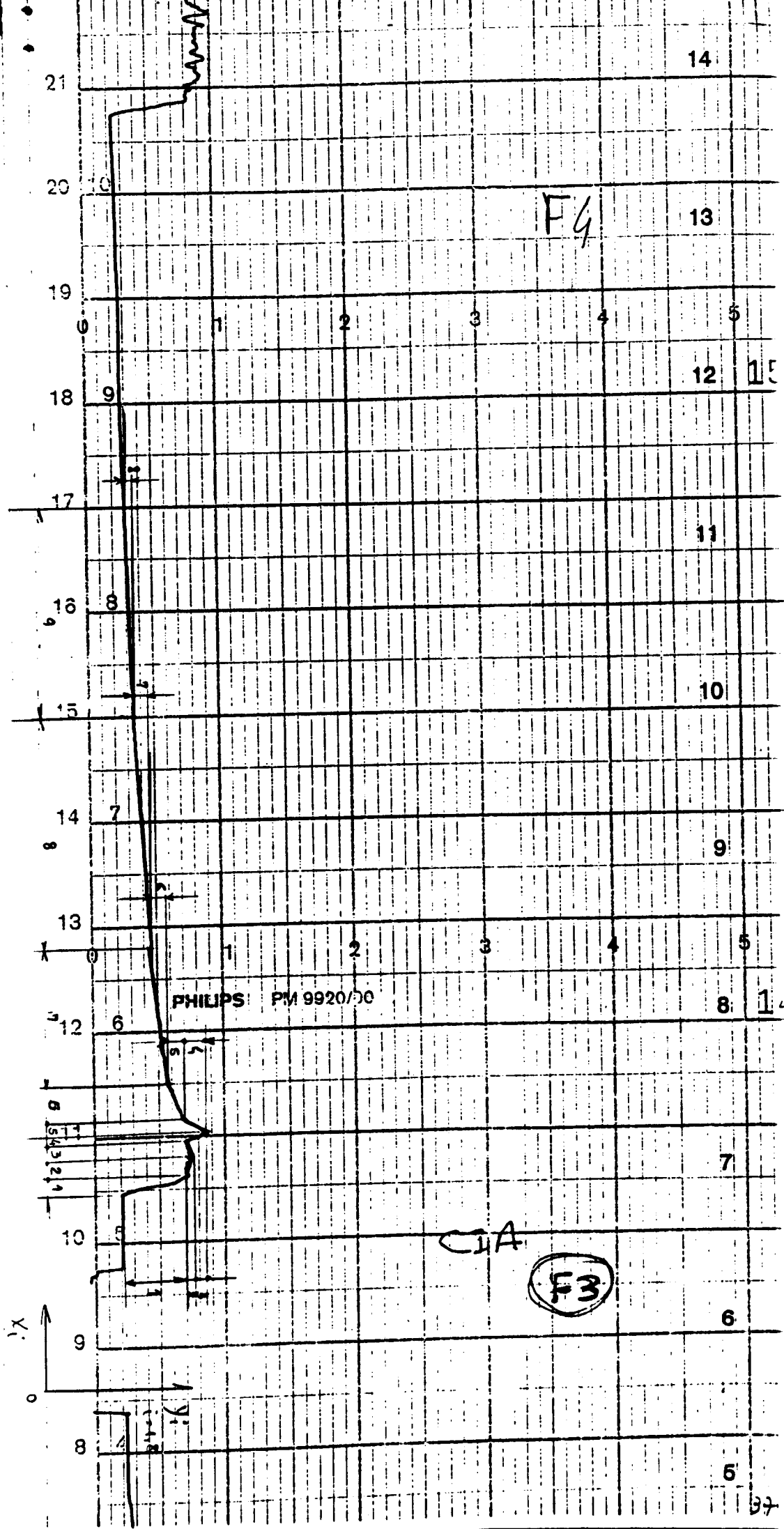
F7 área = 0,442764		
nº interv	t(mm)	Xco2(mm)
1	1	10
2	0,75	13
3	0,25	14
4	1,25	14
5	0,75	15
6	0,5	13
7	1	16
8	1	13
9	2,5	13
10	1,75	15
11	5	12
12	1,25	13,5
13	1	11,5
14	1	13,5
15	1,25	12
16	0,75	12,5
17	0,25	11
18	1	12
19	1,25	11
20	1,25	11
21	1	10
22	4,25	10
23	1,25	9
24	2	11
25	3	8,5
26	8	7
27	34	6
28	69	4
29	24	2
30	17	1,75
31	13	0,25
32	14	0
total = 202,3		

F6 área = 0,70704		
nº interv	t(mm)	Xco2(mm)
0	0,2	1,8
1	0,2	1,9
2	0,3	1,7
3	1	2,7
4	1,9	1,7
5	3,9	1,1
6	2,4	0,4
7		0
total = 9,9		

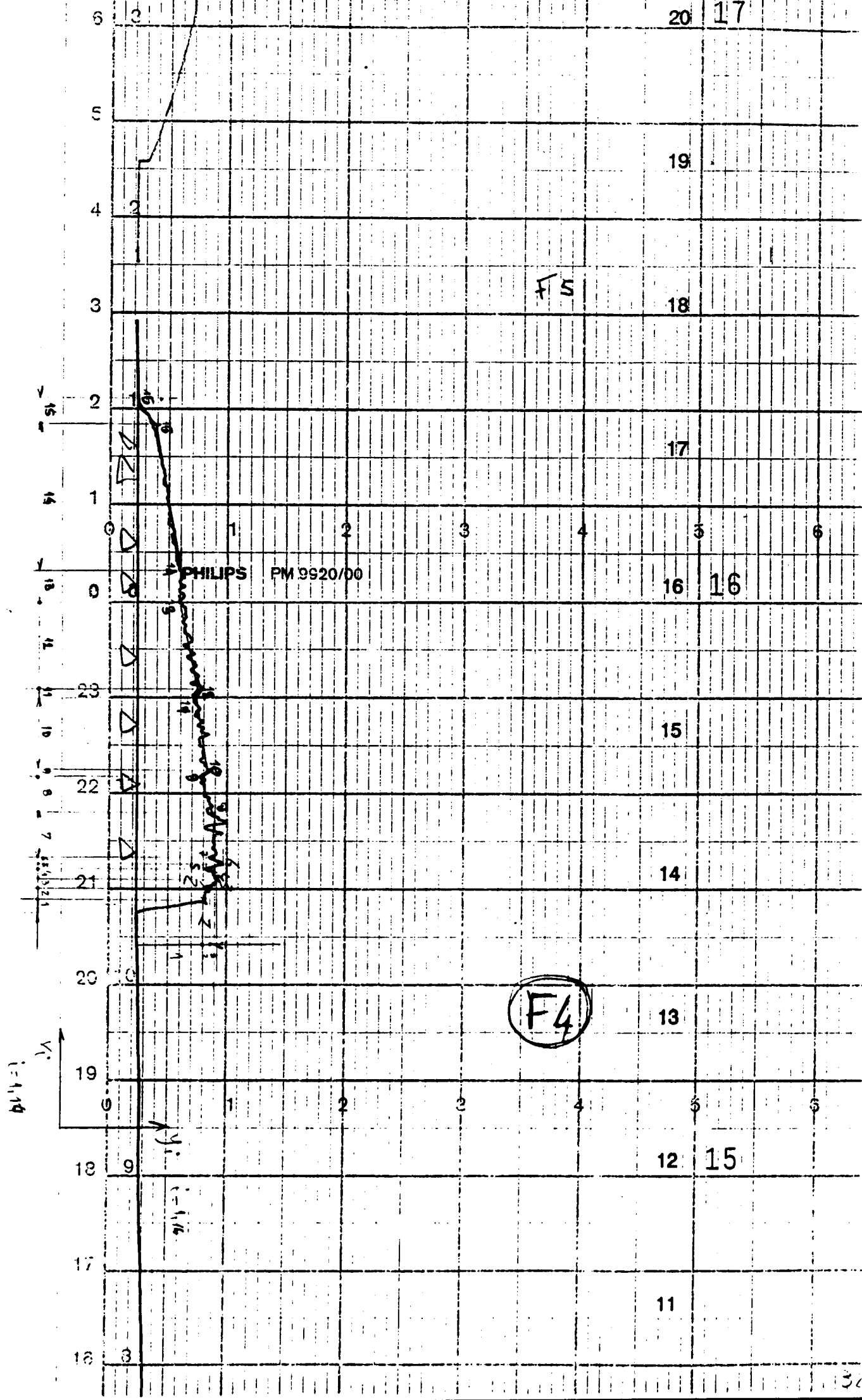
F5 área = 0,280008		
nº interv	t(mm)	Xco2(mm)
0	0	2
1	17	7
2	1	7
3	13	11
4	9	11
5	2	14
6	1	11
7	2	11
8	3	8
9	10	5
10	16	3
11	10	2
12	13	2
13	39	0
total = 136		

F4 área = 0,74958		
nº interv	t (mm)	Xco2(mm)
1	0,3	1,9
2	0,15	2,1
3	0,2	2,2
4	0,2	1
5	0,1	1,8
6	0,1	2,2
7	1,1	1,9
8	0,75	1,9
9	0,15	1,55
10	1,5	1,7
11	0,2	1,35
12	0,18	1,55
13	0,65	1,05
14	3,05	1,05
15	3,1	0,55
16	0,5	0
total 10,8		

F3 área = 0,3759		
nº interv	t(mm)	Xco2(mm)
0	0,35	1,25
1	0,3	1,45
2	0,3,	1,25
3	0,3	1,65
4	0,2	1,25
5	0,25	0,95
6	0,65	0,65
7	2,6	0,35
8	4,4	0,2
9	4	0,2
total = 13,10		



4135



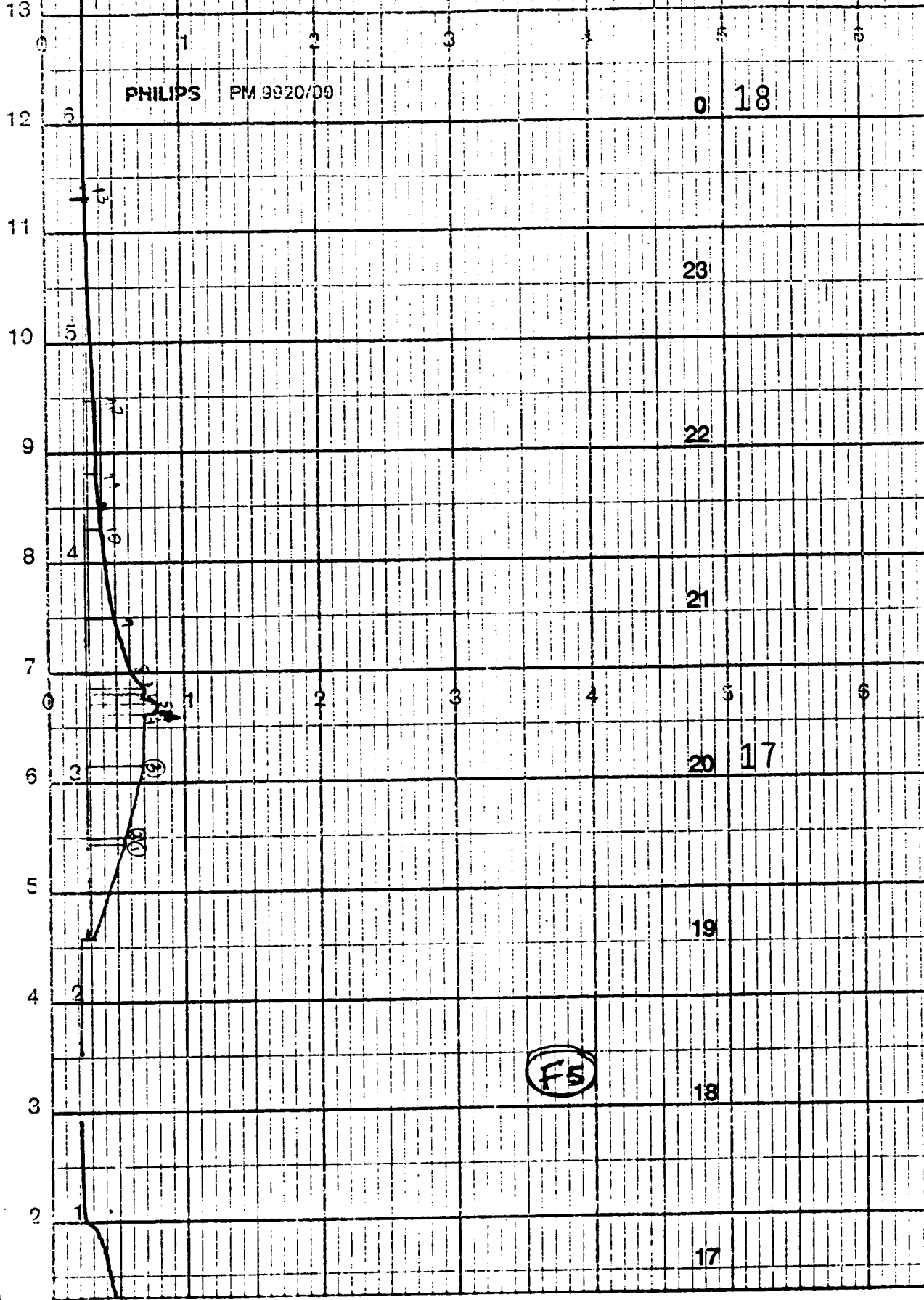


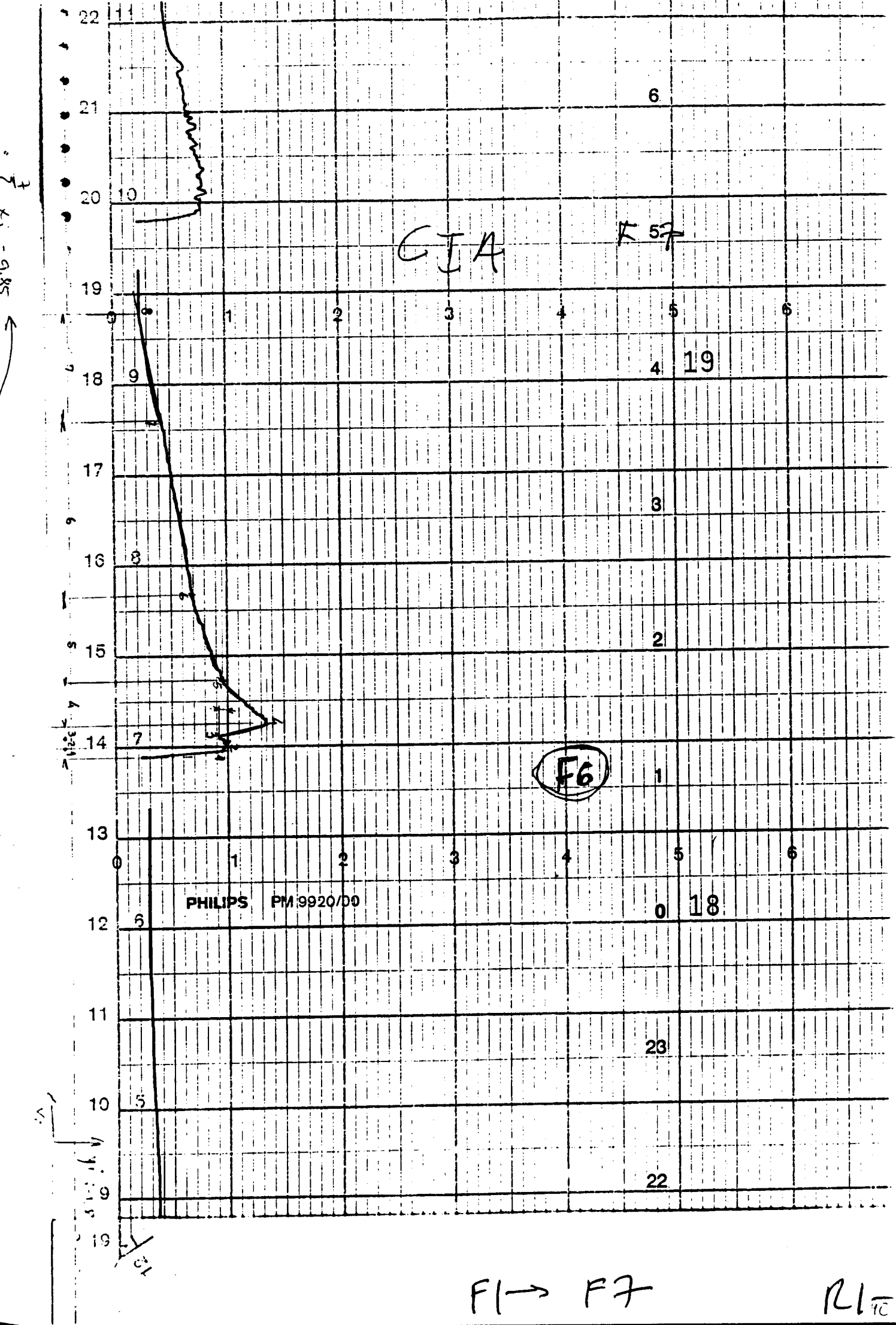
Fig. 138 mm

F1 → F7

R

ES61 → ES65

32



CÁLCULO DE FTQ

$$FTQ = \frac{m_{CO2.SAÍDA}}{m_{CARBONO.NA.CARGA}} \quad ; \quad FCF = FTQ \times 57.3\%$$

$$m_3 = 0,1055g$$

$$F3 \rightarrow \frac{0,3759 \times 12 \times 1,0205 \times 10^5 \times 23,612 \times 10^{-2} \times 0,005368}{0,1055 \times 10^3 \times 0,573 \times 8314 \times 1214} = 93.5\%$$

93,5% $\Rightarrow$ FCF = 53,6% $\therefore$ A partícula tinha muito pouca cinza

$$m_4 = 0,1041 g$$

$$F4 \rightarrow \frac{0,74958 \times 12 \times 1,0205 \times 10^5 \times 23,612 \times 10^{-2} \times 0,005368}{0,1041 \times 10^{-3} \times 0,573 \times 1241} = 189 \%$$

189% $\Rightarrow$ FCF = 108% $\therefore$ impossível

$$m_5 = 0,1096 g$$

$$F5 \rightarrow \quad \quad \quad FTQ = 67,1\% \Rightarrow FCF = 38,45\%$$

$$m_6 = 0,1120 g$$

$$F6 \rightarrow \frac{0,70704 \times 12 \times 1,0205 \times 10^5 \times 23,612 \times 10^{-2} \times 0,005368}{0,1120 \times 10^{-3} \times 0,573 \times 8314 \times 1241} = 165.7 \%$$

$$165.7\% \Rightarrow FCF = 94.95\%$$

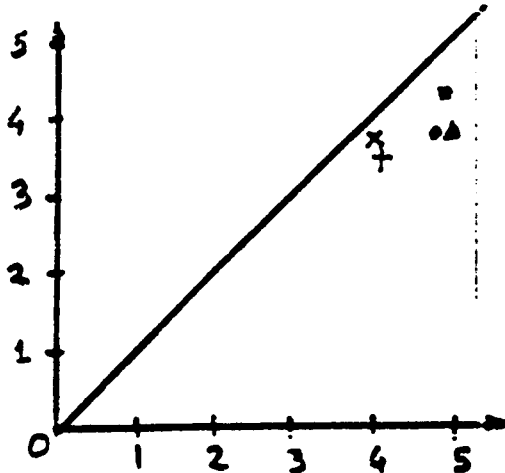
$$m_7 = 0,1088 g$$

$$F7 \rightarrow \quad \quad \quad FTQ = 106.84\% \Rightarrow FCF = 61.22\%$$

ANEXO a

EXP	$d[\text{mm}]$	$T[^\circ\text{C}]$	$Sh'/\epsilon_{\text{EXP}} (Pr=2)$	$D_c''[\text{cm}^2/\text{s}] (Pr=2)$	$Sh'/\epsilon_{\text{TEOR.}}$
E177	5,0	1.000	3,75	0,485	4,8
E166	5,0	950	3,83	0,562	4,9
E171	5,0	950	4,31	0,511	4,9
E179	3,0	1.000	3,67	1,128	3,97
E168	3,0	950	3,52	1,082	4,07

$Sh'/\epsilon_{\text{EXP}}$



• E177

▲ E166

■ E171

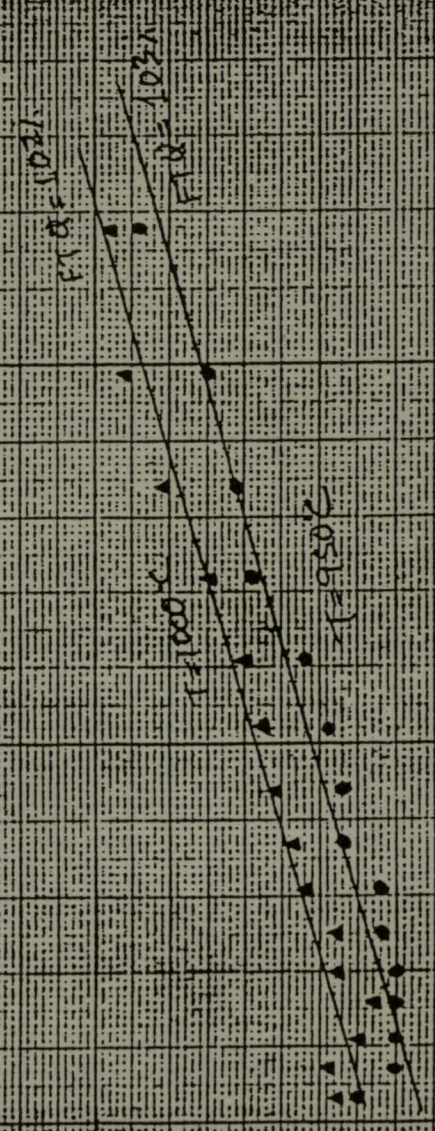
× E179

† E168

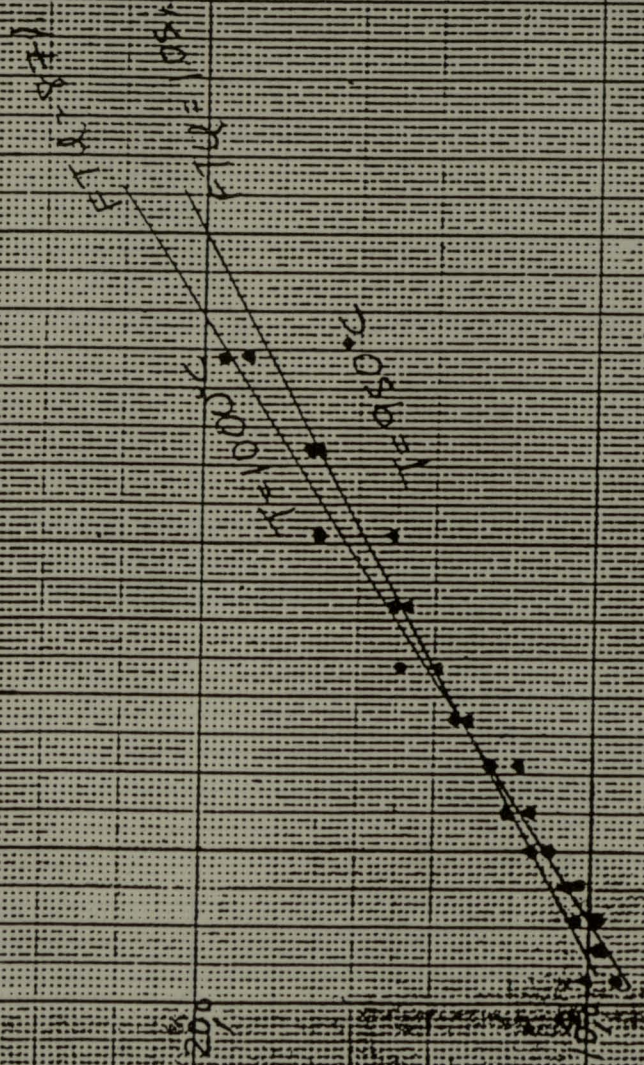
$Sh'/\epsilon_{\text{TEOR.}}$

$$\rightarrow Sh'/\epsilon_{\text{TEOR.}} = \left[4 + 0,576 (Pe'_m)^{0,778} + 1,28 (Pe'_m) + 0,141 \left(\frac{d}{d_i} \right) (Pe'_m)^2 \right]^{1/2}$$

$$\rightarrow Pe'_m = \frac{U_m d_i}{\epsilon D_m}$$



0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0



2172
2176

2172
2176

0.8

0.7

0.6

0.5

0.4

0.3

0.2

0.1

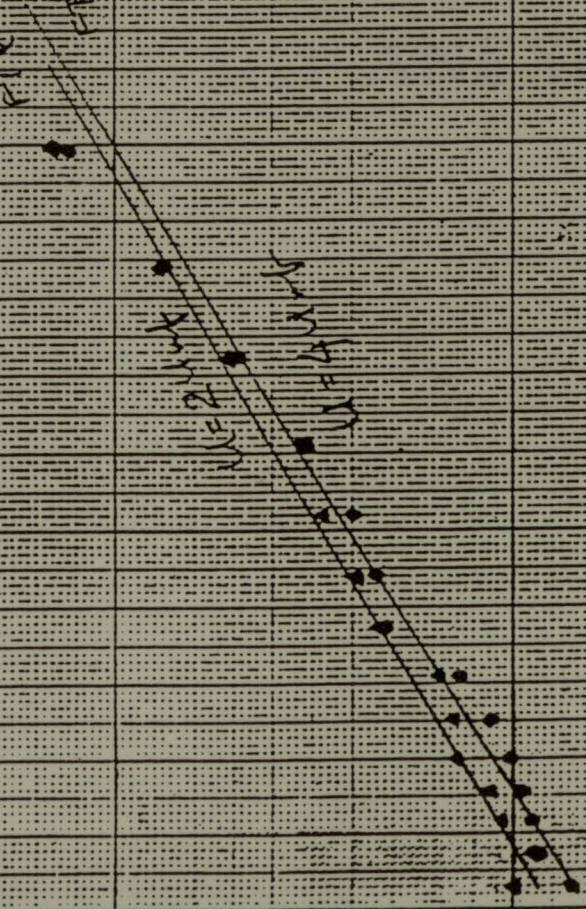
0.0

$\frac{1}{2} \frac{dP}{dV}$
 $\frac{1}{2} \frac{dP}{dV}$

0.1
 0.2
 0.3
 0.4
 0.5
 0.6
 0.7
 0.8
 0.9
 1.0

$1001 + 1021$
 1050
 1010

$W = 2 \times 10^{-4}$
 $W = 4 \times 10^{-5}$



$1001 + 1021$
 1050

ANEXO E

CÁLCULO DO $d_{APARENTE}$ DAS PARTICULAS PARA OS ENSAIOS F30 E F31

$$\left. \begin{array}{l} d_i = 5,0 \text{ mm} \quad N_1 = 2 \\ d_i = 3,0 \text{ mm} \quad \underline{N_2 = 2} \\ N_T = 4 \end{array} \right\} m_t = m_{P+v} - m_V$$

$$m_T = m_{P+v} - m_V = 54,155 - 63,9043 = 0,2512 \text{ g}$$

$$m_T = 1529 \times \frac{\pi}{6} \times (d_{ap})^3 \times 4 = 0,0002512$$

$$d_{ap} = \left(\frac{0,0002512}{\frac{1529 \times \pi \times 4}{6}} \right)^{1/3} = 4,28 \text{ mm}$$

$$4,18 < d_{ap} = 4,28 < 4,38$$

$\swarrow$ $\searrow$ $\swarrow$ $\searrow$
 $-0,1$ $+0,1$

$$\left. \begin{array}{l} m \\ D = 4,18 \end{array} \right| \rightarrow m = \frac{1529 \times \pi \times (0,00418)^3}{6} = 0,058 \text{ g}$$

$$\left. \begin{array}{l} m \\ D = 4,38 \end{array} \right| \rightarrow m = \frac{1529 \times \pi \times (0,00438)^3}{6} \times 1 = 0,0673 \text{ g}$$

$$0,058 \text{ g} < 0,2512 < 0,0673 \text{ g}$$

PREPARAÇÃO DE PARTÍCULAS PARA QUEIMA

Metodologia seguida:

- 1) Seleção dos lotes finais
- 2) Introdução na mufla a $\cong 100^{\circ}\text{C}$ durante $\cong 15$ min
- 3) Introdução no excitador (silica - gel) durante $\cong 5$ a 7 min
- 4) Pesagem, cálculo dos m_T e catalogação para queima

Outros cálculos necessários para proceder à queima

Queima em 93/05/21:

ROT - 6A - 150G $\rightarrow$ POS 7S

$$p_d = 759,5 \text{ mmHg} = 1,012 \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2$$

$$T_d = 19 + 273 = 192 \text{ K}$$

$$d = 0,650 \text{ mm}$$

$$\dot{U}_{N_2} = 34,887 \times \frac{760}{759,5} \times \frac{292}{288} = 35,394828 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$\dot{U}_{CO_2} = \frac{5}{8,95} = 0,558695$$

$$\frac{U}{U_{mf}} = \frac{27,26}{16,0} \cong 1,7$$

Queima em 93/05/24 :

ROT - 6A - 150G $\rightarrow$ POS 5S

$$\begin{aligned} p_{dia} &= 751,9 \text{ mmHg} = 0,7519 \times 9,8 \times 13600 \times 10 \text{ dyn/cm}^2 = \\ &= 1,002 \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2 \end{aligned}$$

$$T_{dia} = 19 + 273 = 292 \text{ K}$$

$$\dot{U}_{N_2} = \frac{312,5}{53,69} \times \frac{760}{751,9} \times \frac{1242}{293} = 24,94 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$d = 0,5$$

$$\frac{U}{U_{mf}} = 1,6$$

ANEXO F

LISTAGEM DE VALORES OBTIDOS VIA EXPERIMENTAL PARA OS
DIFERENTES ENSAIOS

$$p_{dia} = 1.012 \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2$$

F21		
f	t(s)	1/Ko (s/m)
0,125	42,2	1,97
0,25	71,6	2,35
0,375	107	2,53
0,5	151	2,27
0,625	202,9	2,76
0,75	279,2	2,8
0,875	375,4	2,55
1	504	
FTQ = 95,5%		

F22		
f	t(s)	1/Ko (s/m)
0,125	57,3	2,26
0,25	91,8	2,26
0,375	130,8	2,57
0,5	174,3	2,22
0,625	222,7	2,52
0,75	295,2	2,63
0,875	387,2	2,12
1	4922	
FTQ = 95,6%		

F23		
f	t(s)	1/Ko (s/m)
0,125	58,9	1,63
0,25	91,8	1,67
0,375	146,3	1,81
0,5	205,5	2,03
0,625	283,3	2,18
0,75	394,2	2,86
0,875	—	—
1	5702	
FTQ = 81,7%		

F24		
f	t(s)	1/Ko (s/m)
0,125	45,7	1,28
0,25	81,3	1,32
0,375	121,5	1,39
0,5	168,8	1,46
0,625	228,7	1,56
0,75	318,4	2,02
0,875	475,3	3,83
1	5762	
FTQ = 88,4%		

F26		
f	t(s)	1/Ko (s/m)
0,125	47,9	1,55
0,25	90,1	1,67
0,375	138,6	1,57
0,5	194,6	1,66
0,625	264,6	1,71
0,75	248,4	1,66
0,875	510,5	6,99
1	5402	
FTQ = 87,8%		

F31		
f	t(s)	1/Ko (s/m)
0,125	45,3	2,51
0,25	81,8	2,36
0,375	122,5	2,37
0,5	167,8	2,17
0,625	218,6	2,08
0,75	279,8	2,05
0,875	403,4	7,86
1	4922	
FTQ = 88,8%		

F31		
f	t(s)	1/Ko (s/m)
0,125	31,1	2,67
0,25	56,4	2,63
0,375	84	2,41
0,5	113,4	2,49
0,625	149,9	2,4
0,75	192,7	2,32
0,875	253,3	7,48
1	3121	
FTQ = 91,9%		

$$\frac{1}{K_o} = \frac{\pi d^2 (t) (0,21 - \Delta X)}{U. A. \Delta X}$$

Apresentam-se seguidamente as curvas relativas a X_{CO_2} e temperaturas obtidas no registador.

Encontram-se aqui os registos relativos aos ensaios de F21 a F32 a título de exemplo. É através deles possível obter por medição o valor da fracção total de que queima ($f=1,000$, já registado nas tabelas anteriores).

F1	tqc= 112mm= 672s	U = 10mm/min = 0,1666...mm/s
F2	tqc= 140mm= 840s	
F3	tqc= 200mm= 1200s	
F4	tqc= 123mm= 738s	
F5	tqc= 130mm= 780s	
F6	tqc= 105mm= 630s	
F7	tqc= 205mm= 1230s	
F8	tqc= 140mm= 840s	
F9	tqc= 205mm= 1230s	
F10	tqc= 242mm= 1453s	
F11	tqc= 47mm= 564s	U = 300mm/h = 0,0833mm/s
F12	tqc= 147mm= 1764s	
F21	tqc= 420mm= 5040s	U = 300mm/h = 0,0833mm/s
F22	tqc= 410mm= 4922s	
F23	tqc= 475mm= 5702s	
F24	tqc= 480mm= 5762s	
F25	tqc= 480mm= 5762s	
F26	tqc= 450mm= 5402s	
F27	tqc= 490mm= 5882s	
F28	tqc= 250mm= 3001s	
F29	tqc= 320mm= 3841s	
F30	tqc= 300mm= 3601s	
F31	tqc= 410mm= 4922s	
F32	tqc= 260mm= 3121s	

ANEXO G

$$U_A > \frac{U_{mf}}{E} \quad e \quad X > 3,0 \quad (\infty)$$

$$U_A = ?$$

$$\begin{cases} U_A = (U - U_{mf}) + 0,711(g De)^{1/2} \\ U \neq 2x U_{mf} \\ \hline U = 2 \times 16 \times 10^{-2} = 32 \times 10^{-2} \text{ m/s} \end{cases}$$

$$U_A = (32 - 16) \times 10^{-2} + 0,711 (9,8 \times De)^{1/2}$$

$$De = ?$$

$$\overline{De} = \frac{0,3 \times (U - U_{mf})^{0,4} \times H_{mf}^{0,8}}{g^{0,2}}$$

$$\overline{De} = \frac{0,3 \times (32 \times 10^{-2} - 16 \times 10^{-2})^{0,4} \times (15 \times 10^{-2})^{0,8}}{(9,8)^{0,2}}$$

$$\overline{De} = 0,0200 \text{ m} \Rightarrow \overline{De} = 20 \text{ mm}$$

$$U_A \cong 0,475 \text{ m/s}$$

$$X = \frac{6,34 H_{mf}}{De (g De)^{1/2}} \left[U_{mf} + \left(\frac{Emf}{1+Emf} \right) \frac{1,3 D_m^{1/2} g^{1/4}}{De^{1/4}} \right]$$

$$X = \frac{6,34 \times 15 \times 10^{-2}}{0,02 \times (9,8 \times 0,02)^{1/2}} \times \left[16 \times 10^{-2} \left(\frac{0,4}{0,4+1} \right) \times \frac{1,3 \times (1,808 \times 10^{-4})^{1/2} \times 9,8^{1/4}}{(0,002)^{1/4}} \right]$$

$$X = \underline{19,7}$$

$$X \gg 3 \quad \text{c.q.d.}$$

Finalmente:

$$U_A > \frac{U_{mf}}{E} \quad \wedge$$

$$X > 3 \quad (\infty)$$

$$0,475 > \frac{16}{0,4}$$

$$E = 0,4 \text{ (40\% de$$

poros)

$$0,475 \text{ m/s} > 0,4 \text{ m/s}$$

$\wedge$

$$X = 19,7$$

ANEXO H

Modelo teórico:

$$K^{-1} = \frac{d(t)}{\phi Sh' D' m}$$

$$Sh' = \frac{E}{\sqrt{2}} \left[4 + Pemf^{0,78} + 1,28 Pemf + 0,41 \left(\frac{d}{d1} \right) Pe^2 mf \right]^{1/2}$$

$$Pemf = \frac{(Umf/E)d1\sqrt{2}}{Dm}$$

$$= \left(\frac{17,66 \times 10^{-2}}{0,4} \right) \times 4,28 \times 10^{-3} \times (D'm)^{-1}$$

$$= 10,45$$

$$Sh' = \frac{0,4}{\sqrt{2}} \left[4 + 10,45^{0,78} + 1,28 \times 10,45 + 0,141 \times 0,152 \times 10,45^2 \right]^{1/2}$$

$$= 1,979 \quad \cong 2$$

ANEXO I

f(-)	t(s)	1/K(s/m ³) =R
0,072	16,7	0,5976
0,14	33,1	0,6229
0,204	49,3	0,6504
0,265	65,4	0,6802
0,322	81,1	0,7128
0,427	112	0,788
0,519	142	0,8808
0,598	171,1	1
0,664	199,2	1,1663
0,693	212,9	1,2935
0,718	226,4	1,4087
0,741	239,6	1,4662
0,804	277,8	1,6651
0,856	313,6	1,914
0,909	357,7	2,36
0,955	406,3	3,227
1	504,3	

f(-)	t(s)	1/K(s/m ³) =R
0,08	14,5	0,6627
0,156	28,8	0,692
0,227	42,8	0,7212
0,295	56,6	0,7527
0,358	70,2	0,7866
0,474	96,6	0,8632
0,575	121,9	0,9538
0,663	146,2	1,0629
0,737	169,5	1,1964
0,801	191,6	1,3637
0,853	212,6	1,58
0,895	232,4	1,87
0,928	251	2,288
0,952	268,2	2,968
0,961	276,4	3,5686
0,968	284,1	4,405
0,974	291,5	4,819
0,98	298,6	5,303
0,991	317,5	7,407
0,995	328	9,782
1	348,6	

f(-)	t(s)	1/K(s/m ³) =R
0,066	16,9	0,3561
0,129	33,6	0,3693
0,188	50,1	0,3834
0,245	66,3	0,3986
0,299	82,3	0,4149
0,35	98,1	0,4325
0,399	113,1	0,4516
0,444	128,9	0,4724
0,527	158,8	0,5202
0,6	187,8	0,5794
0,663	215,7	0,6617
0,69	229,3	0,7043
0,716	242,6	0,7331
0,741	255m7	0,7639
0,783	281,1	0,8325
0,805	293,4	0,8708
0,858	328,7	1,0056
0,9	361,6	1,1798
0,95	410,4	1,6135
1	508,7	

F21	t(s)	1/Ko (s/m)
0.125	42,2	1,97
0.250	71,6	2,35
0,375	107	2,53
0,5	151	2,27
0,625	202,9	2,76
0,75	279,2	2,8
0,875	375,4	2,55
FTQ=95,5%		

F22	t(s)	1/Ko (s/m)
0.125	57,3	2,26
0.250	91,8	2,26
0,375	130,8	2,57
0,5	174,3	2,22
0,625	222,7	2,52
0,75	295,2	2,63
0,875	387,2	2,12
FTQ=95,60%		

F23	t(s)	1/Ko (s/m)
0.125	56,9	1,63
0.250	98,1	1,67
0,375	146,3	1,81
0,5	205,5	2,03
0,625	283,3	2,18
0,75	394,2	2,86
0,875	—	—
FTQ=81,7%		

F24	t(s)	1/Ko (s/m)
0.125	45,7	1,28
0.250	81,3	1,32
0,375	121,5	1,39
0,5	168,8	1,46
0,625	228,7	1,56
0,75	318,4	2,02
0,875	475,3	3,83
FTQ=88,4%		

F26	t(s)	1/Ko (s/m)
0.125	47,9	1,55
0.250	90,1	1,67
0,375	138,6	1,57
0,5	194,6	1,66
0,625	264,6	1,71
0,75	348,4	1,66
0,875	510,5	6,99
FTQ=87,80%		

F31	t(s)	1/Ko (s/m)
0.125	45,3	2,51
0.250	81,8	2,36
0,375	122,5	2,37
0,5	167,8	2,17
0,625	218,6	2,08
0,75	279,8	2,05
0,875	403,4	7,86
FTQ=88,8%		

F32	t(s)	1/Ko (s/m)
0.125	31,1	2,67
0.250	56,4	2,63
0,375	84	2,41
0,5	113,4	2,49
0,625	149,9	2,4
0,75	192,7	2,32
0,875	253,3	7,48
FTQ=91,9%		



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000101514