

FACULDADE DE ENGENHARIA DO PORTO
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA
GABINETE DE FLUIDOS E CALOR

JORGE JOSÉ GOMES MARTINS

**ESTUDO NUMERICO MONODIMENSIONAL
DA QUEIMA DE UMA
PARTICULA DE SLURRY DE CARVÃO**

JORGE JOSÉ GOMES MARTINS

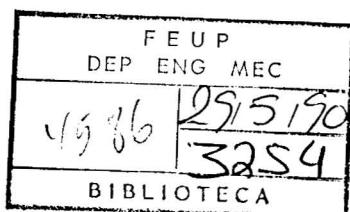
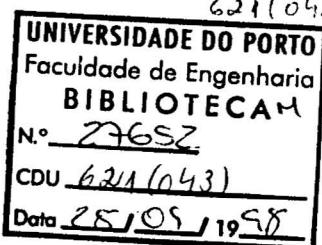
ESTUDO NUMÉRICO MONODIMENSIONAL
DA QUEIMA DE UMA
PARTICULA DE SLURRY DE CARVÃO



DENEGI-FEUP

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade
do Porto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Térmica

621(043)/MAR/EST



A handwritten mark consisting of 'A/1' above 'M/ATZ'.

FACULDADE DE ENGENHARIA DA

UNIVERSIDADE DO PORTO

1985

R E S U M O

Neste trabalho são elaborados modelos que permitem acompanhar a evolução da queima de uma partícula de carvão pulverizado, aglomerado com água (slurry). Posteriormente é apresentado um programa em Fortran77, com a aplicação dos referidos modelos.

São consideradas três fases na queima da partícula: evaporação da água, libertação e queima dos voláteis e queima do resíduo carbonoso.

Na fase de evaporação da água constroi-se um modelo subdividido em duas partes, uma em que a partícula é tida como uma gota líquida, em virtude de haver líquido à sua superfície, e outra em que se considera a difusão de massa dentro da partícula em virtude de haver já pouca água e em que se utiliza um modelo simples de secagem.

Na desvolatilização usa-se um modelo de produção de voláteis em duas fases, uma a baixa temperatura e outra a alta temperatura, que é dominante. O modelo de transferência de calor proposto considera a convecção e a radiação para as paredes.

Na fase de queima do resíduo carbonoso elabora-se um modelo no qual as dimensões exteriores da partícula não sofrem alteração, como é constatado em verificações experimentais.

São calculadas propriedades da partícula e da atmosfera circundante, bem como os efeitos das suas interacções mútuas, como por exemplo a velocidade relativa partícula/escoamento.

A aptidão do combustível à queima foi simulada em computador, para diversos valores de excesso de ar, de diâmetro, de temperatura do ar, de temperatura da parede e de temperatura da partícula. Os resultados obtidos são encorajadores e sugerem a sua implementação em programa experimental.

AGRADECIMENTOS

Não posso apresentar este trabalho sem antes deixar uma palavra de carinho a todos aqueles que tornaram possível ou de algum modo ajudaram na sua realização.

Não é sem boas recordações que aqui figuro os diferentes aspectos de ajuda que tive e me permitiram singrar perante a tarefa a realizar. Teria sido, sem dúvida, impossível a sua conclusão se não tivesse usufruído do apoio familiar, com especial ênfase ao da minha mulher, que sempre colocou a premência da elaboração deste trabalho acima de outras realizações e que com grande paciência e por vezes em situações excepcionalmente delicadas, me encorajou nos momentos mais difíceis.

De todos os colegas e docentes que sempre me apoiaram, no mínimo moralmente, quero referenciar as atitudes do meu orientador de tese, professor Mário Nina, do Instituto Superior Técnico, que malgrado ter de se deslocar penosamente entre as duas maiores cidades, o fez sempre com a maior dedicação e o mais atempadamenta possível.

Incompleto ficaria este espaço se aqui não referisse o valioso contributo do professor Carlos Pinho, que embora não estivesse ligado ao meu curso, me apoiou incansavelmente, e todos os colegas, com especial relevo para o Armando Oliveira.

Por outro lado, na Universidade do Minho sempre fui apoiado pelas pessoas pertencentes à minha área, especialmente pelo grande amigo Heitor de Almeida e por todos os que permitiram a escrita deste trabalho.

Finalmente quero deixar uma palavra de agradecimento aos encarregados da parte de computação, no Porto, que me forneceram significativa ajuda.

LISTA DE SIMBOLOS

$$a = \lambda(dt/dr)$$

A - área superficial ou coeficiente de Arrhenius

Apr - área projectada

$$b = Cp.G.r / \lambda$$

B - coeficiente de Arrhenius ou factor de frequência

C - concentração

C_{CO} - concentração de dióxido de carbono

C_d - coeficiente de arrasto

CH₄ - metano

CO - monóxido de carbono

CO₂ - dióxido de carbono

C_p - capacidade calorífica

C_s - concentração de oxigénio à superfície

C_xH_y - hidrocarbonetos

d - diâmetro

D - difusibilidade

D_c - difusibilidade do oxidante na cinza

D_{CO} - difusibilidade do dióxido de carbono

D_i - difusibilidade do oxidante no interior dos poros

D_{int} - difusibilidade do vapor de água no interior dos poros

D_O - difusibilidade do oxigénio

D_O - difusibilidade à temperatura de referência (T=298K)

E - energia de activação ou quantidade de energia

e_c - espessura de cinza

F - factor de forma

F_d - força de arrasto

G - fluxo mássico

- G_{CO} - fluxo māssico do dióxido de carbono
G_{conv} - fluxo māssico devido à convecção
G_{dif} - fluxo māssico devido à difusão
G_f - fluxo māssico de carbono
G_O - fluxo māssico de oxigénio
G_{Ox} - fluxo māssico de oxidante
G_{Vap} - fluxo māssico devido à vaporização
h - coeficiente de transferência de calor
h_o - entalpia
H_c - calor de combustão do carvão
h_d - coeficiente de transferência de massa
H_{r₁} - calor de reacção à temperatura de referência (T=298K)
H_{r₂} - calor de reacção
H_v - calor de combustão dos voláteis
H₂ - hidrogénio
H_{2O} - água
i = iw(1+ig)
i_{CO₂} - coeficiente estequiométrico da reacção C + O₂ → CO₂
ig - coeficiente estequiométrico da reacção C + CO₂ → 2 CO
iw - coeficiente estequiométrico da reacção O₂ + 2 CO → 2 CO₂
k - coeficiente de desvolatilização ou constante de reacção
K - constante de reacção referida ao infinito
k_c - resistividade à difusão na cinza
k_d - resistividade à difusão
k₁, k₂, k₃, k₄ - Coeficientes usados no método de Runge-Kutta
L - calor latente de vaporização
L_c - comprimento característico
m - fracção māssica
M - massa
m_{c,o} - massa de carvão seco e sem cinza

- m_p - fração mássica de água na partícula
 m_C - massa de carvão queimado
 m_{Cf} - massa de carbono fixo
 m_{CO} - fração mássica de dióxido de carbono
 M_{CO} - massa molar de dióxido de carbono
 m_O - fração mássica de oxigénio
 M_O - massa molar de oxigénio
 M_0 - massa de água inicial
 $n = m_O + m_{CO} / (1 + ig)$
 n - expoente usado no cálculo da difusibilidade
 Nu - número de Nusselt
 O_2 - oxigénio
 p - pressão
 Pr - número de Prandtl
 Q - quantidade de calor
 Q_C - quantidade de calor (referida à partícula)
 Q_q - quantidade de calor resultante da combustão
 Q_v - quantidade de calor resultante da queima dos voláteis
 r - distância ao centro da partícula
 r_o - raio do slurry
 r_i - raio de carvão não queimado
 R - constante dos gases perfeitos
 Re - número de Reynolds
 ρ_{oa} - massa específica aparente
 S - saturação ou massa de resíduos carbonosos sólidos
 S_C - número de Schmidth
 S_i - quociente entre área interna e volume
 t - tempo
 T - temperatura absoluta
 Th - módulo de Thiele

T₀ - temperatura de referência (298K)

U - velocidade do ar

v = V-U velocidade relativa

v - volume específico

V - velocidade da partícula ou massa de voláteis ou volume da partícula

V_a - volume de água

V_{int} - volume dos interstícios

V_i - volume do carvão não queimado

-- Símbolos gregos --

α - coeficiente estequiométrico de massa

ξ - emissividade

$\Gamma = \lambda/C_p$

λ - coeficiente de condutibilidade.

μ - viscosidade

ρ - massa específica

τ - constante de Stefan-Boltzman

-- Subscritos --

ar - envolvente gasosa

f - final

p - partícula ou parede ou produtos de reacção

r - reagentes

0 - à superfície da partícula

1 - reacção a baixa temperatura

2 - reacção a alta temperatura

∞ - longe da partícula ou longo tempo depois

LISTA DE GRAVURAS

- Figura 1 - Temperaturas máximas / Excesso de ar
- Figura 2 - Temperaturas máximas / Diâmetro da partícula
- Figura 3 - Temperaturas máximas / Temperatura do ar injectado
- Figura 4 - Temperaturas máximas / Temperatura da parede
- Figura 5 - Temperaturas máximas / Temperatura da partícula
- Figura 6 - Tempos de permanência / Excesso de ar
- Figura 7 - Tempos de permanência / Diâmetro da partícula
- Figura 8 - Tempos de permanência / Temperatura do ar injectado
- Figura 9 - Tempos de permanência / Temperatura da parede
- Figura 10 - Tempos de permanência / Temperatura da partícula
- Figura 11 - Aproximação quadrática da curva Tempo / Diâmetro
- Figura 12 - Distância necessária para a queima / Excesso de ar
- Figura 13 - Distância necessária para a queima / Diâmetro
- Figura 14 - Distância nec. para a queima / Temperatura do ar
- Figura 15 - Distância nec. para a queima / Temperatura da part.
- Figura 16 - Temperaturas / Comprimento da cámara
- Figura 17 - Quantidades de água, voláteis, oxigénio e carbono fixo em cada ponto da cámara
- Figura 18 - Temperaturas máximas / Excesso de ar
- Figura 19 - Temperaturas máximas nas várias condições
- Figura 20 - Tempo de permanência na cámara nas várias condições
- Figura 21 - Distância necessária para a queima nas várias cond.

I N D I C E

Resumo	i
Agradecimentos	ii
lista de símbolos	iii
lista de gravuras	vii
índice	viii
1 - Introdução	1
2 - Modelos físicos	4
2.1 - Generalidades	4
2.2 - Evaporação	8
2.2.1 - Escolha do modelo	9
2.2.2 - Equações de conservação de massa e energia	9
2.2.3 - Modelo para a fase de humidade crítica	15
2.3 - Desvolatilização	18
2.3.1 - Escolha do modelo	18
2.3.2 - Processo de cálculo	20
2.3.3 - Modelo de transferência de calor	22
2.4 - Queima	25
2.4.1 - Escolha do modelo	26
2.4.2 - Cálculo de k, kd e kc	28
2.4.3 - Equações de energia	35
3 - Modelo de cálculo	37
3.1 - Apresentação do algoritmo	37
3.1.1 - Subrotinas principais	39
3.1.2 - Subrotinas de apoio	40
3.2 - Subrotina "evaporação"	43
3.3 - Subrotina "voláteis"	45

3.5 - Subrotina "velocidade"	49
3.6 - Escolha do intervalo de tempo	52
4 - Resultados e análise paramétrica	54
4.1 - Excesso de ar	59
4.2 - Diametro da particula	62
4.3 - Variação da composição do slurry	64
4.4 - Temperatura do ar primário e secundário	66
4.5 - Temperatura da parede	67
4.6 - Temperatura da partícula no momento da sua injecção	68
4.7 - Eleição dos parâmetros mais importantes	69
5 - Conclusões	70
6 - Bibliografia	73
- Anexo 1 - Diagramas de sequência	
- Anexo 2 - Listagem do programa	
- Anexo 3 - Exemplo de entrada de dados	

CAPITULO 1 -- INTRODUCAO

Desde que se tornou notória a exiguidade das reservas de petróleo comparativamente com as de carvão e principalmente com a subida de preço a partir de 1974, desenvolveram-se esforços no sentido da intensificação do uso deste último em detrimento do petróleo. Por outro lado em virtude da maior parte das instalações de queima estar preparada para receber combustíveis líquidos, o aparecimento de um fluido à base de carvão aparece como uma solução bastante lógica. A primeira tentativa desta abordagem a nível industrial deu-se na Alemanha durante a segunda guerra mundial, com a liquefação do carvão para usos militares. No entanto este procedimento não é rentável mesmo com o desenvolvimento presente e na altura os imperativos eram de natureza bélica.

Assim apareceu na década de 70 uma tecnologia promissora utilizando carvão pulverizado misturado com fueloleo que tem potencialidade de substituir o petróleo em algumas aplicações, nomeadamente em instalações fixas de queima. Os custos de transporte deste combustível serão inferiores aos do carvão, pois assim poderá ser bombado em "pipelines" por um preço em cerca de um terço inferior ao do transporte por via férria ou terreste.

Ainda nessa década vários investigadores estudaram a queima de "slurries" de carvão com fuel e em raros casos com água. Poderei citar alguns nomes: C.K.Law, H.K.Law, C.H.Lee, W.L. Grosshandler, K.Miyasaka, M.Lavid, L.A.Ruth, R.S.Scheffee, R.H. Salvesson, T.W.Bruce, H.Mongia entre outros.

No presente trabalho tratar-se-há o caso da queima de

slurries de carvão e água. Este obtém-se juntando carvão finamente pulverizado (aproximadamente 20 microns de diâmetro), água e uma pequena porção de aditivo para manter a mistura estável. O combustível em questão poderá ser queimado como um óleo pesado, sendo o tempo de queima superior ao desse caso. Sobre este tipo de slurries escasseia literatura, pois além de um artigo publicado por E.T.McHale et al.[22], nada mais existe em língua inglesa. Segundo este autor a água presente no slurry penalisa em cerca de 3.5% a quantidade de calor libertada, para uma mistura de 35% de água.

O autor, neste trabalho, propõe-se desenvolver um método de cálculo expedito que teste a aptidão, destas misturas, à queima.

O modelo está constituido em três fases. A primeira consiste na evaporação total da água presente, seguindo-se numa segunda fase o aquecimento do carvão e consequente desvolatilização. A terceira fase compreende a queima do carvão remanescente.

No decorrer do cálculo são determinados os valores das propriedades da partícula e do escoamento.

O modelo foi seguidamente implementado no computador, tendo sido elaborado um estudo paramétrico de algumas variáveis que possam levar a conhecer melhor o processo.

Para a fase de vaporização de água não se considerou o mecanismo de radiação, sendo no entanto utilizado nas fases seguintes.

Considerou-se que existe uma certa massa de ar interactuando com cada partícula, de maneira a poder-se verificar em todos os instantes tanto a sua temperatura como as suas características. Essa massa de ar seria fornecida em duas partes distintas do processo. O primeiro fornecimento usar-se-ia

para a secagem e o segundo para a combustão.

Os modelos de queima de voláteis e de carbono fixo assentam no pressuposto que os gases ardem longe da partícula, na envolvente gasosa, e que a combustão do sólido se dá junto da sua superfície.

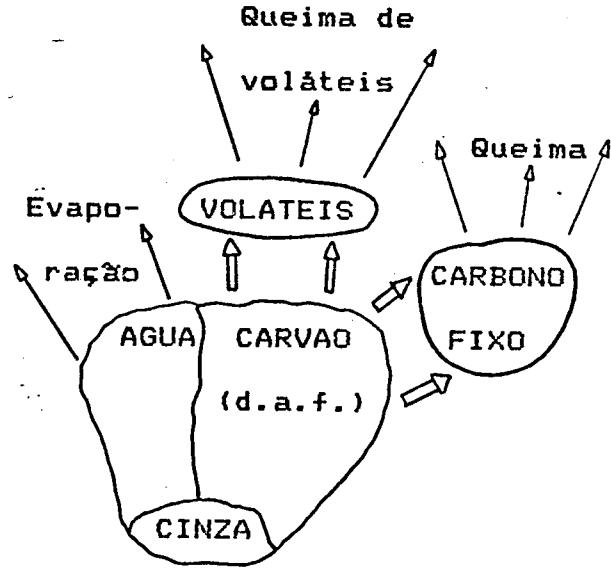
CAPITULO 2 -- MODELOS FISICOS

2.1 - Generalidades

O processo de atomização de um slurry é semelhante ao do fueloil, e por essa razão segue-se uma linha paralela ao do estudo da evaporação de gotas. No caso presente o tamanho das partículas não varia de dimensão tanto na vaporização da água como na combustão do resíduo sólido. Isto deve-se ao facto das partículas depois de secas apresentarem enorme porosidade o que as leva a não "incharem" aquando da desvolatilização. Segundo E.T.McHale et al. [22], a análise às cinzas, indica que as dimensões destas são as mesmas que as das gotas iniciais.

Considera-se que o tamanho da gota de slurry esteja compreendida entre 50 e 100 microns e tenham velocidade relativamente ao meio onde estão enseridas.

O processo pelo qual a partícula reage está representado na figura , na qual esta se considera composta por voláteis no estado gasoso, carbono fixo e cinza no estado sólido e água no líquido. O slurry liberta-se da água evaporando-a. Em seguida, parte do carvão volatiliza-se e arde na envolvente gasosa. Do restante, o carbono fixo arde e fica a cinza como último reduto da partícula.



FIGURA

Em virtude das temperaturas a que decorrem a evaporação e a desvolatilização serem muito diferentes (à volta de 350K e 750K respectivamente) poderemos considerar estes dois modelos como existentes em alturas diferentes e bem definidas. Vários autores são da opinião que durante a desvolatilização o oxigénio não tem possibilidade de avançar até à partícula pois é gasto na frente de chama exterior a esta [20,31]. Assim os modelos referentes à desvolatilização e à queima serão também estanques.

Aparece desta maneira uma compartimentação lógica do algoritmo em três modelos: Evaporação, Volatilização e Queima, que serão estudados individualmente.

O slurry considera-se como um conjunto de esferas de carvão aglomerado com água, de raio r_0 , não interactuando, pois segundo Szekely [36] a distância mínima entre partículas é sempre superior a 8 diâmetros, o que é uma condicionante da não interacção.

A partícula, ainda que formada por diversos constituintes, comporta-se como se estes estivessem idealmente misturados, sendo assim totalmente homogénia. Quando da evaporação e posteriores fases, a matéria que se liberta vai deixando interstícios no seu interior, de maneira que as dimensões exteriores se mantenham.

Os modelos considerar-se-ão não transientes em cada intervalo de tempo. Esta análise é a vulgarmente utilizada em estudos quejandos [11,16,22].

A temperatura na partícula considera-se uniforme em virtude do número de Biot para a esfera ($Bi=h \cdot Lc / \lambda$) ser inferior a 0.1 [14]. Para o cálculo do número de Biot entra-se com o comprimento característico (Lc) que se entende igual ao quociente entre o volume e a área da partícula. Os restantes

símbolos representam o coeficiente de transferência de calor (h) e o coeficiente de condutibilidade térmica (λ).

Desta maneira não é necessária a determinação da transferência de calor dentro da partícula pois afi não haverá diferenciais de temperatura.

Um outro pressuposto assenta na definição da partícula como sendo um corpo cinzento e assim apresentar emissividade inferior à unidade e constante para qualquer comprimento de onda. O interior do forno considera-se negro. Esta análise vulgarmente considerada em estudos do gênero [5,32,39,...], aliada à consideração do gás envolvente como não participante, simplifica grandemente o algoritmo. No caso da vaporização da água, como será explicado mais tarde, não se entrará com o efeito da radiação.

O fornecimento do ar secundário far-se-há num ponto em que a partícula se encontre completamente seca e servirá para fornecer oxidante à combustão e ainda para elevar a temperatura da partícula para um nível, onde se dê a desvolatilização. Este fornecimento é efectuado de uma só vez e o programa define, para cada caso, o local ideal do seu fornecimento.

Uma outra hipótese interessa ficar desde já definida para posterior compreensão do processo de cálculo e que é relacionada com a estrutura da interligação ar/partícula. Considera-se que existe uma relação entre as massas de ar e a do slurry. Assim desde que se conheça a massa de uma partícula, sabe-se a massa de ar que lhe está relacionada. Essa massa de ar está disposta à volta de cada partícula e será com ela que esta efectuará as transferências de calor e massa. Assim a temperatura e composição da massa de ar variará continuamente. Esta análise, seguida, entre outros por Lockwood, parece mais lógica que a

utilizada por outros autores (ex.[10]), em que se considera uma temperatura fixa para o ar dentro da câmara de combustão, assim como para a sua composição.

Ainda no respeitante à interligação térmica da partícula com o meio, falta referir que a temperatura da parede da câmara se considera constante e existe um dado factor de forma (inferior à unidade) partícula/parede, em virtude da existência de várias partículas no escoamento.

Resumindo, temos como pressupostos:

- a partícula é esférica e homogénea
- a temperatura no interior da partícula é uniforme ($Bi=0$)
- as dimensões são invariáveis
- as várias partículas não interactuam
- o forno e a partícula são negro e cinzento respectivamente
- o ar secundário é injectado de uma só vez e quando a partícula estiver seca
- a temperatura da parede é constante
- as três fases de permanência na câmara de combustão (evaporação, desvolatilização e queima) são estanques

2.2 - Evaporação

Das três fases de que consta a queima do slurry, esta é a única endotérmica, uma vez que necessita de calor para a evaporação da água nele contido. Esta quantidade de calor não é, no entanto, de grande significado, em virtude de representar uma pequena percentagem do calor em jogo. Suponhamos que temos um slurry constituído por 35% de água (valor médio das proporções usadas na prática). Se o carvão constituinte tiver um calor de combustão de 25MJ por kg, o respeitante ao slurry será de 16MJ/kg. O calor necessário para a vaporização da água de 1kg de slurry será de $0.35 * 2445 = 856\text{kJ}$ (o valor de 2445 representa o calor de vaporização da água). Este valor penaliza o calor libertado em cerca de 5%.

Supõe-se que o ar primário serve exclusivamente para permitir que o slurry seque. Assim a massa deste é determinada de modo que a partícula seque rapidamente. A secagem deve-se somente à transferência de calor por convecção, entre o ar e a partícula, supondo-se que a radiação tenha uma importância modesta pelas seguintes razões:

- o coeficiente de absorção da partícula molhada é pequeno (grande reflectividade)
- a distância entre partículas é relativamente pequena (muito mais pequena que nas fases seguintes) o que implica pequenos factores de forma partícula / parede
- a temperatura da parede é relativamente baixa, pois não existe combustão nesta zona da câmara.

Supõe-se ainda não existirem reacções químicas nesta fase.

2.2.1 - Escolha do modelo

Existem bastantes publicações sobre a evaporação de gotas, nomeadamente em modelos de queima de combustíveis líquidos. Por outro lado existem também ao dispor modelos de secagem, bastante elaborados, mas usados em situações totalmente diversas das aqui propostas. Assim estes últimos foram deixados de lado, utilizando-se somente em questões pontuais.

O modelo escolhido assemelha-se ao utilizado para o estudo da vaporização de gotas, por Spalding [34] e outros autores. As principais diferenças residem no pressuposto que a partícula não varia de dimensões e que existe uma certa resistência na transferência de massa dentro dela, quando grande parte da água se tiver já evaporado.

2.2.2 - Equações de conservação de massa e energia

Supondo, como atrás se mencionou, que a partícula é tida como uma esfera de raio r , e considerando G a velocidade mássica de vapor por unidade de área, assumindo conservação de massa, teremos:

$$G r = G_0 r_0^2 \quad (2.2.1)$$

em que o subscrito 0 representa os valores à superfície da partícula.

Aplicando a lei de Fick:

$$G_{\text{dif}} = -\Gamma \frac{\partial m}{\partial x}$$

e

$$G_{vap} = G_{dif} + G_{conv} = G_{dif} + m G_{vap}$$

em que G_{vap} , G_{dif} e G_{conv} são respectivamente as velocidades mássicas devidas à vaporização, difusão e convecção.

Assim chega-se a:

$$(m G_{vap} - \Gamma \frac{dm}{dr}) r^2 = G_{vap} r_0^2$$

ou, fazendo $G_{vap}=G$

$$\Gamma \frac{dm}{dr} r^2 = G r_0^2 (m - 1)$$

em que $\Gamma = \lambda / C_p$, sendo λ o coeficiente de condutibilidade e C_p a capacidade calorífica, ambas do vapor de água. m é a fração mássica de vapor.

Dai se passa para:

$$dm / (m-1) = (dr / r^2) \cdot G r_0^2 / \Gamma \quad (2.2.2)$$

o que integrado nos dá:

$$\ln(m-1) = (1/r) \cdot G r_0^2 / \Gamma + Cte$$

Assumindo para condições fronteira em:

$$r = r_0, m = m_0 \implies \ln(m_0 - 1) = - G r_0^2 / \Gamma + Cte$$

$$\text{para } r \rightarrow \infty, m = m_\infty \implies \ln(m_\infty - 1) = Cte$$

que nos dá o valor da constante:

$$Cte = \ln(m_\infty - 1)$$

e chegamos às seguintes equações:

$$G_0 = (\Gamma / r_0) \cdot \ln [(1-m_\infty) / (1-m_0)] \quad (2.2.3)$$

e

$$(1-m) / (1-m_\infty) = [(1-m_0) / (1-m_\infty)] \quad (2.2.4)$$

A variação da massa de água da partícula (M) no tempo, será regida pela seguinte equação diferencial:

$$\frac{dM}{dt} = - G_0 \cdot A \quad (2.2.5)$$

ou

$$\frac{dM}{dt} = - (\Gamma \cdot A / r_0) \cdot \ln [(1-m_\infty) / (1-m_0)] \quad (2.2.5a)$$

em que A representa a área superficial da partícula.

Todas as variáveis presentes verão o seu valor modificar-se quer por alteração da temperatura no escoamento, quer por mudanças sofridas pela transferência de massa da partícula para o ar circundante.

No entanto na expressão (2.2.3) desconhece-se m_0 . Para o seu cálculo far-se-há um balanço de energia entre a superfície da partícula (r_0) e uma distância r , superior a r_0 : $r_0^2 E_0 = r^2 E$, ou

$$r^2 \{-\lambda \frac{dT}{dr} + G [C_p(T - T_0) + h_0]\} = r_0^2 \{-\lambda \frac{dT}{dr}_0 + G_0 h_0\} \quad (2.2.6)$$

em que h_0 é a entalpia e T_0 é temperatura à superfície da partícula. Todas estas variáveis são respeitantes ao vapor de água.

Arranjando a expressão (2.2.6), em que as entalpias se anulam, teremos:

$$\frac{dT}{dr} = [G_0 r_0^2 / (r^2 \lambda)] \cdot [C_p(T - T_0) + \lambda (\frac{dT}{dr})_0 / G_0] \quad (2.2.7)$$

e arranjando para integração:

$$dT / [(T - T_0) + a] = b \cdot dr/r \quad (2.2.7a)$$

sendo $a = \lambda (\frac{dT}{dr})_0 / Cp \cdot G_0$ e $b = Cp \cdot G_0 \cdot r_0^2 / \lambda$

integrando (2.2.7):

$$\ln [(T - T_0) + a] = b (-1/r) + Cte$$

Considerando a condição fronteira $T = T_0$, para $r \rightarrow \infty$:

$$\ln \{[(T - T_0) + a] / [(T_0 - T_0) + a]\} = -b \cdot 1/r$$

Como nos interessam os valores à superfície ($T = T_0$ e $r = r_0$):

$$\ln [a / (T_0 - T_0 + a)] = -b/r_0$$

ou seja

$$1 + (T_0 - T_0)/a = \exp(b/r_0) \quad (2.2.8)$$

e como o coeficiente de transferência de calor é:

$$h = \lambda (\frac{dT}{dr})_0 / (T_0 - T_0)$$

e substituindo os valores de a e de b em (2.2.8), teremos

$$1 + Cp \cdot G_0 / h = \exp (C \cdot G_0 \cdot r_0 / \lambda)$$

onde se poderá tirar o valor de h :

$$h = C_p \cdot G_o / [\exp(C_p \cdot G_o \cdot r_o / \lambda) - 1] \quad (2.2.9)$$

Para validar esta expressão poderemos usar o número de Nusselt ($Nu = h d / \lambda$), pois este será igual a 2 na ausência de convecção e de transferência de massa, o que na realidade acontece.

Como existe velocidade relativa partícula / escoamento, o efeito da convecção existente pode-se introduzir com o auxílio de uma expressão devida a Faeth e Lazar [7]:

$$\dot{M}/\dot{M}' = G/G_o' = 1 + 0.278 Re^{k_1} Sc^{k_2} / (1 + 1.232 / Re Sc^{k_3})^{k_4}$$

e

$$h/h' = 1 + 0.278 Re^{k_5} Pr^{k_6} / (1 + 1.232 / Re Pr^{k_7})^{k_8} \quad (2.2.11)$$

que nos dá uma compensação na transferência de massa e na de calor, respectivamente (\dot{M} representa o fluxo de água).

As quantidades representadas por Re , Sc e Pr são, respectivamente, os números adimensionais de Reynolds, Schmitt e Prandtl, iguais a:

$$Re = (\rho \cdot v \cdot d / \mu), \quad Sc = (\mu / \rho \cdot d), \quad Pr = (\mu \cdot C_p / \lambda)$$

em que ρ representa a massa específica, v a velocidade relativa partícula/escoamento, d o diâmetro da partícula, μ a viscosidade, e C_p a capacidade calorífica.

Considerando a transferência de calor por convecção:

- $Q = h (T_o - T_e)$, e fazendo um balanço de energia no slurry, temos:

$$- Q_o \cdot 4 \pi r_o^2 = M_p C_p \frac{dT}{dt} + G_o L \cdot 4 \pi r_o^2$$

ou

$$\frac{dT}{dt} = - \frac{4 \pi r_o^2 (- Q_o - G_o L)}{(M_p C_p)} \quad (2.2.12)$$

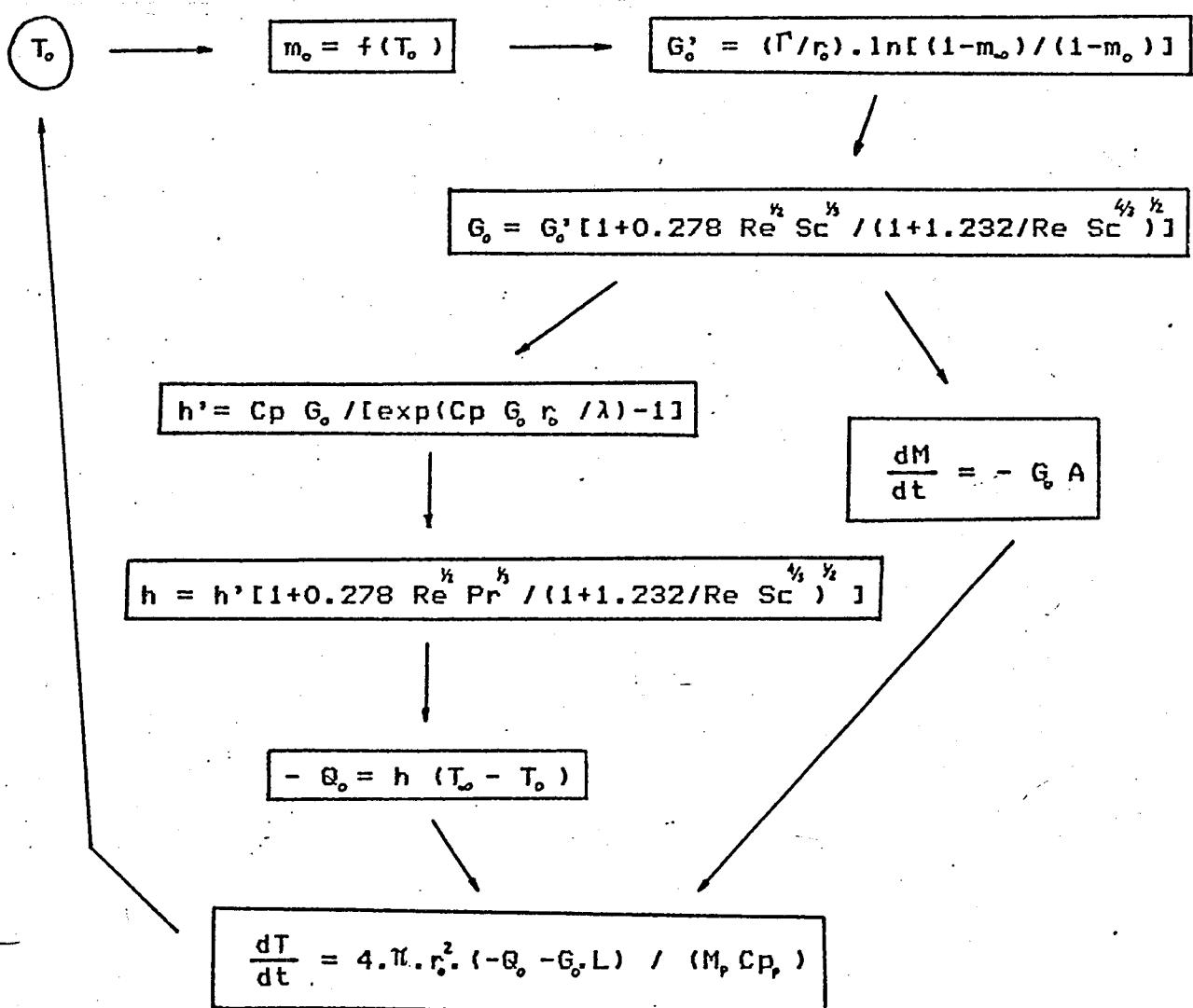
em que L representa o calor latente de vaporização da água, M_p a massa total e C_p , a capacidade calorífica da partícula.

A fórmula de cálculo decorrerá como o diagrama da página seguinte indica.

Falta ainda mencionar a maneira de calcular a fração mísica do vapor à superfície da partícula que se indicou no diagrama como função da temperatura desta. O cálculo é elaborado a partir do valor das pressões de saturação da água a uma dada temperatura. Como se sabe que a pressão dentro da câmara de combustão é a atmosférica, o valor de m_v é-nos dado a partir da expressão:

$$m_v = 1 / [1 + (P / P_{sat} - 1) \cdot (M_{ar} / M_{vap})]$$

em que P e P_{sat} são as pressões total e de saturação, M_{ar} e M_{vap} são as massas molares do ar e do vapor de água.



2.2.3 - Modelo para a fase de humidade critica

O procedimento apresentado no subcapítulo anterior estaria correcto se se tratasse de uma gota líquida, o que não acontece. Por esta razão é necessário dividirmos a evaporação em duas partes: uma constante, respeitante ao período de secagem em que a transferência de massa dentro da partícula não ofereça resistência à evaporação e uma outra em que se tenha que entrar com este factor.

A primeira parte da secagem, dita constante, engloba as equações anteriormente apresentadas, ficando por definir as relativas à segunda, geralmente conhecida como de razão decrescente. A razão da primeira parte ser considerada constante, deve-se ao facto de quando se trata de secagens a temperatura do ar circundante ser geralmente constante o que implica uma constância das propriedades e consequentemente da taxa de secagem. Como já foi visto, no presente caso isto não se verifica, em virtude da massa de ar acompanhar a partícula e assim modificar continuamente as suas propriedades.

O algoritmo usado para esta fase foi apresentado no "Industrial Energy Conservation Course" [15], e refere a taxa (decrescente) de vaporização como proporcional à diferença entre a fração mássica de vapor existente na partícula e a de equilíbrio com o ar. Esta última será precisamente a do ar circundante, pois só com essa fração mássica na partícula ela estará em equilíbrio com o meio.

Este modelo de proporcionalidade entre a taxa de secagem (ou de transferência de massa) e a diferença entre as frações mássicas é geralmente considerado por outros autores,

existindo logicamente diferenças nos restantes termos da expressão. No caso presente a quantidade de vapor libertado é ainda proporcional à sua difusibilidade interna nos poros (D_{int}) e ao comprimento característico (L_c), tido como o quociente entre o volume e a área superficial, que no presente caso é igual a $\pi/3$.

A equação apresenta a forma seguinte:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\pi^2}{4} D_{int} / (L_c^2) \cdot (m_p - m_\infty) \quad (2.2.13)$$

em que m_p representa a fração mássica de vapor na partícula.

O cálculo do coeficiente de difusão no interior dos poros (D_{int}), pode-se efectuar por um processo apresentado em [23], em que este é função da porosidade da partícula (quociente entre o volume de interstícios e o total), da saturação (S) e do valor da difusividade (D), segundo a expressão:

$$D_{int} = D \cdot (V_{int}/V) \cdot (1-S) \quad (2.2.14)$$

em que $S = M/M_0$, ou seja, a saturação é igual ao quociente entre as quantidades de água num dado instante e no inicio.

Desta maneira temos equações que nos dão a taxa de evaporação até à secagem completa. A maneira de as interligar está exposta no capítulo referente ao procedimento de cálculo (cap.3.2).

2.3 - Desvolatilização

Com o fim de se conhecer detalhadamente e de se poder desenvolver modelos numéricos de queima de carvão, alguns investigadores debruçaram-se sobre o estudo da libertação de voláteis. Os modelos mais elaborados começaram a surgir na década de 70 no seguimento do incremento da capacidade e velocidade de cálculo por parte dos computadores e da apreensão gerada em virtude da escassez de recursos energéticos.

2.3.1 - Escolha do modelo

Os voláteis são considerados como sendo libertados na fase gasosa e reagirem com o oxidante longe da superfície da partícula. A desvolatilização de pequenas partículas dura em geral entre 10 e 100 milisegundos, dependendo das temperaturas e do fornecimento de calor, sendo, em primeira análise, superior ao de vaporização e inferior ao de queima.

As técnicas mais gerais do tratamento da desvolatilização constam duma equação diferencial simples de primeira ordem:

$$\frac{dV}{dt} = (V_0 - V) \cdot k$$

onde: V - massa de voláteis libertados por massa de carvão original, no instante t

V_0 - Valor de V para $t=\infty$

e k é obtido a partir de uma equação do tipo Arrhenius:

$$k = B \cdot \exp[-E / (R \cdot T)]$$

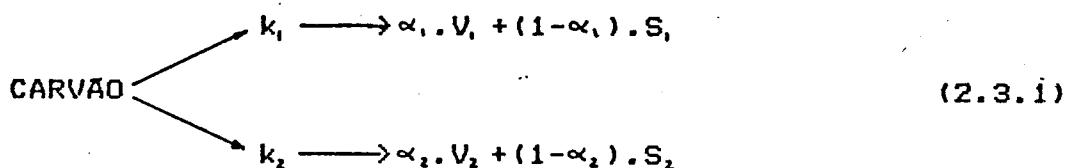
sendo B o factor de frequência aparente, E a energia de activação, R a constante dos gases perfeitos e T a temperatura absoluta da partícula.

Há, no entanto, autores que referem a desvolatilização como uma reacção simples, pois a performance da queima do carvão não é muito sensível à taxa de produção de voláteis. Esta posição é tomada por Lockwood [20], tratando-a como dependente dum constante de desvolatilização:

$$\frac{d}{dt} X = B$$

sendo X a fração de voláteis libertados e B a constante de desvolatilização, igual, neste caso, a 7.25, sendo assim independente da temperatura.

O procedimento mais utilizado para o tratamento da desvolatilização é a utilização de duas reacções sequenciais do tipo Arrhenius [17,31,32,33,40]:



sendo α_i os coeficientes estequiométricos de massa, V_i voláteis, S_i resíduos carbonosos e k os coeficientes de reacção da forma:

$$k_i = B_i \cdot \exp[-E_i / (R \cdot T)] \quad (2.3.2)$$

em que B_i são os pseudo factores de frequência e E_i as pseudo

energias de activação. A reacção de índice 1 é dominante a baixa temperatura, enquanto que a de índice 2 é dominante a alta, sendo o valor de E_2 muito superior ao de E_1 , o que resulta numa maior libertação de gases na segunda reacção, também em virtude do valor de α_2 ser também superior ao de α_1 . Este modelo é reduzido a uma só reacção se a temperatura for suficientemente baixa para que o segundo k seja desprezável. Os coeficientes estequiométricos de massa (α) são escolhidos de acordo com parâmetros do carvão [40].

Uma outra análise do problema é apresentada por Anthony [11] com um modelo incorporando várias reacções de primeira ordem representadas por uma distribuição gaussiana de energias de activação.

2.3.2 - Processo de cálculo

No presente trabalho usar-se-á o modelo de reacção em dois passos, acima descrito pelas reacções das Eqs. (2.3.1). O cálculo da massa de voláteis produzidos é neste caso mais complexo, sendo, segundo Kobayashi [17] dado pela expressão:

$$(V_i + V_2) / m_{t,0} = \int_t^{t+\Delta t} (\alpha_1 \cdot k_1 + \alpha_2 \cdot k_2) \cdot \exp[-\int_t^{t+\Delta t} (k_1 + k_2) dt] dt \quad (2.3.3)$$

sendo V_i a massa de voláteis produzidos na reacção i e $m_{t,0}$ a massa de carvão seco e sem cinza.

Os valores das variáveis a usar nas Eqs. (2.3.2) e (2.3.3), são os apresentados por Kobayashi e também usados por Smoot [17, 32, 33]:

$$\alpha_1 = 0.3$$

$$\alpha_2 = 1$$

$$E_1 = 104.6 \times 10^6 \text{ J/kmole}$$

$$E_2 = 167.5 \times 10^6 \text{ J/kmole}$$

$$B_1 = 2 \times 10^5 \text{ 1/s}$$

$$B_2 = 1.3 \times 10^7 \text{ 1/s}$$

Uma grande limitação na descrição da desvolatilização reside na especificação dos produtos gasosos. No presente trabalho foi escolhida uma composição média de voláteis retirada de duas fontes [21,38]. Optou-se por esta decisão em virtude de raramente estarem declarados os diversos componentes para um dado carvão. No entanto se esta for conhecida (percentagens de metano e hidrogénio bastam) é facilmente introduzida. Considera-se que somente o hidrogénio e os hidrocarbonetos (tidos na globalidade como metano) ardem, sendo os outros considerados inertes ($\text{CO}_2, \text{CO}, \text{N}_2, \text{O}_2$, etc).

A composição média de voláteis escolhida é a seguinte (em percentagem volumétrica):

$\text{H}_2 - 60$

$\text{CH}_4 - 29$

$\text{CO} - 7$

$\text{CO}_2 - 1$

$\text{C}_x\text{H}_y - 2$

Os restantes elementos apresentam valores inferiores a 1%.

Durante a desvolatilização a produção de gases não é constante nem a composição destes é única durante toda esta fase. Não se entrará aqui com a alteração da composição dos voláteis, mas considerar-se-á esta constante ao longo de todo o processo.

A quantidade de massa desvolatilizada é também dependente da temperatura e do tempo de permanência [1], mas neste algoritmo isso não será referido em virtude de não existirem

dados disponíveis suficientes, e a interpretação deles ser difícil por existirem reacções secundárias e questões relativas ao transporte dos voláteis. Considerar-se-á assim que a percentagem de matérias voláteis declarada é a que realmente se liberta, segundo a Eq. (2.3.3), que está relacionada com a temperatura por meio do k (Eq. (2.3.2)).

2.3.3 - Modelo de transferência de calor

A partir do momento em que toda a água se evaporou, a equação regente da transferência de calor tem que se modificar para outra que não inclua transferência de massa. Assim, utilizar-se-á uma equação não transiente que descreva a interacção entre o meio e a partícula, usando convecção e radiação. Como atrás foi mencionado, a temperatura na partícula considera-se constante em virtude do número de Biot ser pequeno [14].

Assim tem-se:

$$-Q = M_p \cdot C_p \frac{dT}{dt} = h \cdot A \cdot (T_w - T_p) + \sigma \cdot A \cdot \varepsilon \cdot F \cdot (T_p^4 - T_w^4) \quad (2.3.4)$$

sendo: Q a quantidade de calor fornecida à partícula, que será igual à elevação de temperatura vezes a massa M_p , e vezes o calor específico C_p ; A a área superficial da partícula ($4\pi r^2$), σ a constante de Stefan Boltzman, ε a emissividade do carvão, F o factor de forma partícula-parede, T_p a temperatura da parede e h o coeficiente de convecção definido a partir do número de Nusselt por uma correlação devida a Ranz [5, 24, 26]:

$$Nu = h d / \lambda = 2 + 0.6 Re^{\frac{2}{3}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (2.3.5)$$

sendo Re o número de Reynolds e Pr o de Prandtl já anteriormente definidos (cap.2.2).

As duas formas de transferência (radiação e convecção) podem-se simplesmente adicionar, incorrendo-se assim com um erro inferior a 10% [29].

A transferência de calor para a fase gasosa dá-se somente por convecção, já que se admite que este meio é não participante, e teremos uma equação similar ao caso da evaporação:

$$M_a \cdot C_p \frac{dT}{dt} = h \cdot A \cdot (T_o - T_\infty) + Q_v \quad (2.3.6)$$

em que M_a é a massa de ar à volta de cada partícula e T_∞ a sua temperatura. O Q_v é um termo de fonte originado pela queima dos voláteis na fase gasosa e é dado por:

$$Q_v = (V_1 + V_2) \cdot Hv$$

em que $(V_1 + V_2)$ é calculado pela Eq. (2.3.3), Hv o calor de combustão dos voláteis, que é uma média pesada dos do Hidrogénio e do Metano. A quantidade de Oxigénio consumida é proporcional à de voláteis e iv (coeficiente estequiométrico de massa na queima dos voláteis) é o coeficiente de proporcionalidade, que também é calculado como média pesada.

As equações químicas segundo as quais reagem o Hidrogénio e o Metano são:



Calculando as quantidades de calor em jogo em cada equação com os valores das entalpias de formação [16], temos que a primeira liberta 50.18E6 J/kg de Metano e a segunda 121E6 J/kg de Hidrogénio. Estes valores são relativos à temperatura de 298K, pelo que se torna necessário referi-los à temperatura das reacções. Assim ter-se-á que calcular o calor de reacção que passa pelo conhecimento das curvas das capacidades caloríficas dos produtos e dos reagentes e pelas suas integrações [16]:

$$H_r = H_r + \int_{T_1}^{T_2} (p \cdot C_p - r \cdot C_p) dT \quad (2.3.9)$$

em que p representa o número de moles dos produtos, r o dos reagentes, e os C_p são os calores específicos (o índice p indica produtos de reacção e o r reagentes). Se $X_j = N_j/N_t$, em que N_j é o número de moles de j e N_t o número total de moles, então:

$$C_p = \sum_i X_i \cdot C_{p_i} \quad (2.3.10a)$$

$$C_p = \sum_j X_j \cdot C_{p_j} \quad (2.3.10b)$$

No cálculo do coeficiente de arrasto da partícula devido ao escoamento, não estão previstas correções devidas à libertação de voláteis, o que segundo Lockwood [20] não merece grande consideração.

Falta ainda referir que devido à inexistência de radiação entre partículas, não é possível sustentar a combustão de carvões desvolatilizados, a não ser que a temperatura da parede seja superior a 1100K, ou que a temperatura do ar possa elevar a das partículas para valores desta ordem. Os 1100K aparecem como limite inferior da combustão do carvão fixo.

2.4 - Queima

Os modelos para queima de carvão apareceram há algumas décadas, no entanto, pelas razões apontadas aquando do estudo da desvolatilização, foram acrescidos de significativa ênfase na década de 70. Em épocas anteriores foram desenvolvidos por motivações não tão práticas como as actuais, em que necessitamos de modelos que sirvam para controlar e gerir processos reais de utilização. No presente caso o autor serve-se de modelos já existentes para visualizar uma situação ainda não muito bem descrita na prática.

Sendo este um estudo monodimensional, não poderá descrever sucintamente todos os processos por que passam as partículas, encontrando-se as maiores lacunas no campo da aerodinâmica que, fora o cálculo das velocidades relativas partícula/escoamento, nada mais adianta. Há ainda o problema da interacção entre partículas (considerada inexistente) e da sua concentração, que levantam incorrecções nomeadamente nos mecanismos de radiação. Uma outra restrição para este género de modelos é a complexidade dos processos químicos e físicos que não poderão ser na globalidade descritos, em virtude do largo esforço computacional requerido e por alguns desses processos serem ainda desconhecidos.

Torna-se pois necessário, sempre que possível, proceder à validação dos modelos descritos, pois só assim se conseguirá uma parametrização correcta dos processos. Isso envolve leituras promenorizadas no tempo e no espaço de várias propriedades típicas nestes estudos:

-temperatura do gás

- velocidade do gás
- composição do gás
- temperatura da partícula
- velocidade da partícula
- dimensões da partícula
- composição da partícula ou densidade aparente
- distribuição de tamanhos da partícula
- temperaturas das paredes
- geometria da câmara
- propriedades das paredes
- valor dos fluxos de radiação
- determinação das trajectórias das partículas

2.4.1 - Escolha do modelo

Existem numerosos modelos para a queima de carvão consoante se trate de uma, duas ou três dimensões, transiente ou não transiente, leito fixo, fluidizado ou carvão pulverizado, etc. Torna-se, por conseguinte, impossível definir um só modelo para todas estas aplicações. No presente caso trata-se, como já foi referido, de um modelo monodimensional, não transiente de carvão pulverizado.

A queima terá lugar quando o carvão tiver sido completamente desvolatilizado. Desta maneira considera-se que a partícula estará a uma temperatura elevada, o que dispensa o uso dum mecanismo para a ignição. Como também foi referido, a queima dar-se-á com conservação de dimensões da partícula.

Seguindo uma análise como a de Levenspiel [19], uma esfera nestas condições pode reagir de duas maneiras: ou a reacção se

dá em todo o volume, sendo para isso necessário que o oxidante exista misturado com o combustível ou que chegue ao seu interior sem grande resistência, ou haverá uma frente de chama que separa a zona de cinza da de combustível. Estes dois modelos são conhecidos, um como de conversão progressiva e o outro, de núcleo não reactivo. Será fácil decidirmos em favor do segundo pois considera-se que o carvão queima à superfície.

Para o segundo destes modelos existem cinco passos necessários ocorrendo sucessivamente durante a reacção:

- difusão do oxidante na camada limite
- penetração e difusão do oxidante na "casca" de cinza
- reacção à superfície do combustível
- difusão dos produtos da reacção na "casca" de cinza
- difusão dos produtos na camada limite

Se todos ou alguns destes passos existirem, considera-se que oferecem uma resistência global igual à soma das resistências de cada passo.

Considerando k como a constante de reacção química e C_s a concentração de oxidante à superfície, o fluxo de oxidante, G_{ox} (fluxo de massa por unidade de área e de tempo), será:

$$G_{ox} = k \cdot C_s = K \cdot C_s \quad (2.4.1)$$

em que K é a constante de reacção química referida à concentração no infinito C_∞ .

Se considerarmos ainda k_d referente à difusão até à partícula, e k_c referente à difusão na cinza, K virá:

$$K = 1 / (1/k + 1/k_c + 1/k_d) = k \cdot k_c \cdot k_d / (k \cdot k_c + k \cdot k_d + k_c \cdot k_d) \quad (2.4.2)$$

(notar que os vários "kappa's" representam não resistências, mas o seu inverso, ou seja resistividades)

Em virtude da evaporação da água e da desvolatilização, a partícula fica muito porosa e será necessário contabilizar este aumento de área interna. O procedimento a usar está descrito por Glassman [11], chegando a uma expressão que modifica o k para:

$$k' = k + Th \cdot Di / r_e \cdot [\coth(Th) - 1/Th]$$

em que $Th = (Si \cdot k)^{1/2} \cdot r_e^{1/2} / Di$, é o chamado módulo de Thiele. Di representa o valor da difusão no interior dos poros e Si é o valor do quociente entre a superfície interna e o volume da partícula.

Se o valor de Th for baixo (inferior a 0.55), representando a queima de pequenas partículas ou a baixas temperaturas (reação controlada pela cinética) a $\coth(Th)$ pode ser desenvolvida em série, considerando somente os dois primeiros termos:

$$\coth(Th) = 1/Th + Th/3$$

$$\text{e então } k' = k \cdot [1 + (Si \cdot r_e / 3)] \quad (2.4.3)$$

Se Th for superior ao valor apontado, $k' = k$.

2.4.2 - Cálculo de k, kd e kc

A expressão que dá origem ao valor de k, foi já há bastante tempo estabelecida como sendo do tipo Arrhenius [9]:

$$k = A \cdot \exp [-E/(R \cdot T)] \quad (2.4.4)$$

sendo A o coeficiente de Arrhenius, E a energia de activação, R a constante dos gases perfeitos e T a temperatura. Os valores de A de E, e a própria expressão foram retirados de Field et al.[9].

No caso presente a expressão (2.4.4) foi modificada, de maneira a apresentar valores no sistema internacional. Assim houve uma modificação da dita expressão para:

$$k = B \cdot T \cdot \exp [-E/(R \cdot T)] \quad (2.4.4a)$$

Nesta expressão os valores e unidades das variáveis a usar são os seguintes:

$$B = 595.7 \text{ m/s.K}$$

$$E = 149.5E6 \text{ J/kmole}$$

$$R = 8314 \text{ J/kmole.K}$$

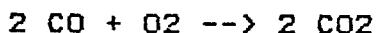
Deve-se notar que os valores de B e de E são diferentes de carvão para carvão. Os escolhidos, na impossibilidade de definição exacta do tipo de carvão a usar, são os referidos em [9]. Outros valores para estas variáveis estão disponíveis em várias obras, podendo ser encontrados nas referências [31,32,33].

O modelo de combustão usado pressupõe que se dá produção de CO na superfície da partícula em virtude da reacção com o oxigénio do meio circundante. O monóxido de carbono arde posteriormente na fase gasosa, produzindo CO₂, exteriormente à partícula.

As equações químicas correspondentes são:



Há, nas questões de queima de carvão, a impossibilidade da precisão aquanto do desenrolar das reacções explicativas do processo de combustão. Admite-se, porém, que se desenvolverão além da acima descrita (reacção de oxidação), uma outra reacção de redução do dióxido de carbono em monóxido, na partícula e da sua posterior queima:



A queima dá-se realmente segundo estas duas reacções, sendo em diferentes casos, uma e outra a terem preponderância. As eqs. (2.4.5) e (2.4.6) ocorrem a uma temperatura inferior relativamente às acima descritas.

A temperatura a partir da qual a equação de redução supera em importância a de oxidação, considera-se geralmente à volta de 1800K.

Para o modelo considerado (relativo à temperatura mais baixa), a equação de conservação de massa é:

$$\frac{d}{dr} r^i f D \frac{dm_o}{dr} - Gf r^i \frac{dm_o}{dr} = 0 \quad (2.4.7)$$

em que m_o é a fração massica de oxigénio e D representa a difusibilidade do oxigénio. O i é o coeficiente estequiométrico de massa da Eq. (2.4.5). Os valores de r e r são respectivamente

do raio da partícula e de uma distância qualquer dum ponto ao centro desta. ρ representa a massa espessífica do ar, enquanto que G_f , o fluxo mássico de combustível.

Integrando (2.4.7), chega-se a :

$$r^2 \int D \frac{dm_o}{dr} - G_f r^2 m_o = Cte$$

A constante pode-se determinar sabendo que à superfície da partícula:

$$\int D \frac{dm_o}{dr} - G_f m_o = G_o = G_f / i$$

assim a constante será:

$$Cte = G_f r_s^2 / i$$

e ficará:

$$r^2 \int D \frac{dm_o}{dr} - G_f r^2 m_o = G_f r^2 / i \quad (2.4.8)$$

integrando outra vez a equação:

$$r^2 \int D / (G_f r^2) \frac{dm_o}{dr} = m_o + 1/i$$

teremos

$$\ln (m_o + 1/i) = - G_f r^2 / (\int D dr) + Cte$$

Impondo a condição fronteira $m_o = m_{\infty}$, para $r \rightarrow \infty$:

$$Cte = \ln (m_{\infty} + 1/i)$$

implica:

$$\ln [(m_0 + 1/i) / (m_{0*} + 1/i)] = - G_f r_e^2 / (\rho D r)$$

Impondo a condição fronteira $m_0 = m_{0*}$, para $r = r_e$:

$$- G_f r_e / (\rho D) = \ln [(m_0 + 1/i) / (m_{0*} + 1/i)]$$

como $hd = \rho D / r_e$ (2.4.9)

e trocando o sinal:

$$G_f = hd \ln [(m_0 + 1/i) / (m_{0*} + 1/i)] \quad (2.4.10)$$

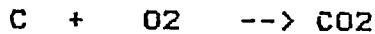
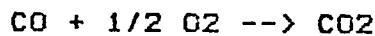
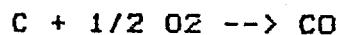
em que hd representa o coeficiente de transferência de massa.

Pela Eq. (2.4.5) o valor de i virá:

$$i = M_o / M_c = 12/16 = 0.75$$

em que M_o e M_c são as massas molares de oxigénio e de carbono, respectivamente.

A relação entre o consumo de oxigénio e o de carbono será igual ao coeficiente estequiométrico da queima de carvão a CO_2 , porque a adição das duas equações que tem lugar, (Eqs. (2.4.5) e (2.4.6)), será:



(2.4.11)

assim $i\text{CO}_2 = 12/32 = 0.357$ é o coeficiente estequiométrico da

Eq. (2.4.11) e chega-se à relação:

$$G_{ox} = G_f / iCO_2. \quad (2.4.12)$$

Se a única resistência à queima fosse a difusão teríamos:

$$G_f = h_d \ln [(m_{\infty} + 1/i) / (m_0 + 1/i)] \quad (2.4.10)$$

sendo

$$h_d = (D_f / d) \cdot (2 + 0.6 Re^{0.5} Sc^{0.5}) \quad [26] \quad (2.4.13)$$

o coeficiente de transferência de massa, em que d é o diâmetro.

Por outro lado $G_f = iCO_2 k_d C_\infty$

onde se tem que

$$k_d = h_d \ln [(m_{\infty} + 1/i) / (m_0 + 1/i)] / (iCO_2 C_\infty) \quad (2.4.14)$$

O cálculo de k_d é mais simplificado:

$$k_d = D_c / e_c \quad (2.4.15)$$

em que D_c é a difusividade do oxidante na camada de cinza, e e_c a espessura dessa camada.

Para calcular o valor de e_c é necessário calcular a densidade aparente do carbono fixo na esfera, o que será:

$$\rho_{ox} = m_{ci} / V$$

em que m_{ci} é a massa de carbono fixo e V o volume da esfera. Assim para uma certa massa de carvão não queimado m_C o volume por ela ocupado será:

$$V_1 = \frac{4 \pi r^3}{3}$$

e como $V_1 = m_C / \rho_{oa}$

o valor de r será:

$$r = [3 V_1 / (4 \pi)]^{1/3}$$

e

$$\epsilon_C = r_o - r = r_o - [3 V_1 / (4 \pi)]^{1/3} \quad (2.4.16)$$

Persiste ainda uma incógnita que é o valor da fração massica de oxigénio à superfície da partícula (m_O).

Para o seu cálculo teremos que igualar:

$$G_f = iCO_2 K_{Co}$$

a

$$G_f = iCO_2 [k_{kd} / (k + k_{kd})] C_o$$

equação que é obtida a partir das condições à superfície ($r = r_o$), e teremos:

$$m_O = m_O \cdot k_{kd} \cdot (k + k_{kd}) / (k \cdot k_{kd} + k \cdot k_{kd} + k_{kd} \cdot k_{kd}) \quad (2.4.17)$$

2.4.3 - Equações de energia

Tal como no modelo da desvolatilização considera-se aqui convecção e radiação partícula - parede. Neste caso o calor proveniente da combustão do carbono, em virtude de esta se dar à superfície, é integrado na partícula sólida e no oxidante que viaja até ela.

A equação diferencial que mostra o comportamento térmico da partícula é:

$$Q_c = M_p C_p \frac{dT_p}{dt} = A h (T_p - T_\infty) + \tau \epsilon F A (T_p^4 - T_\infty^4) + G_f A H_c \quad (2.4.18)$$

enquanto que a do ar será:

$$Q_a = M_a C_{p_a} \frac{dT_a}{dt} = A h (T_a - T_\infty)$$

em virtude de se considerar este um meio não participante. Como no capítulo anterior, M_p e M_a representam as massas da partícula e da sua envolvente gasosa, A é a área superficial, τ a constante de Stefan-Boltzman, ϵ a emissividade do carvão, F o factor de forma radiactivo partícula - parede e h o coeficiente de transferência de calor definido por:

$$h = (\lambda / d) \cdot (2 + 0.6 Re^{0.4} Pr^{0.7})$$

Aparece aqui, no entanto, uma questão que se prende com a maneira de distribuir o calor proveniente da combustão pela partícula e pelo oxidante. Supõe-se que os produtos da combustão resultantes são libertados à mesma temperatura da partícula, o

que implica a necessidade de um balanço de energia entre gás e partícula, para se calcular esta temperatura final:

$$M_a \ C_{p_a} \frac{dT_a}{dt} = - M_p \ C_{p_p} \frac{dT_p}{dt}$$

O que linearizando as temperaturas, nos permite calcular o valor da temperatura final (T_f):

$$M_a \ C_{p_a} (T_f - T_\infty) = M_p \ C_{p_p} (T_0 - T_f) \quad (2.4.19)$$

que será a temperatura da partícula. Para se chegar à temperatura do gás circundante, junta-se a massa de produtos gasosos a T_f e a massa do restante ar a T_0 .

CAPITULO 3 -- MODELO DE CALCULO

3.1 - Apresentação do algoritmo

Como atrás foi referido, o algoritmo para o cálculo da combustão de uma partícula de aglomerado de carvão pulverizado com água (slurry), é realizado em três estágios distintos: inicia-se com a evaporação da água, seguidamente o carvão libera os voláteis que ardem na atmosfera circundante e por fim dá-se a queima do resíduo carbonoso.

Todas as variáveis e constantes que aparecem ao longo do programa estão dimensionadas no sistema internacional (S.I.). Uma lista exaustiva é apresentada no início da listagem, onde estão indicados o seu significado e as suas unidades.

O programa, à parte das subrotinas, limita-se à função de iniciação de variáveis, determinação do intervalo de tempo (se grande de mais será encortado), cálculo das temperaturas máximas, determinação da posição da partícula na câmara de combustão e a chamada das subrotinas. Os números adimensionais (Reynolds, Prandtl e Schmidth) são nele definidos.

Entre a chamada das subrotinas "evaporação" e "voláteis", calcula-se a temperatura da mistura do ar primário com o secundário. Este cálculo é efectuado com conservação de entalpia dos gases ($h_o = C_p T$).

Supõe-se que a partícula em questão esteja inserida num "spray", havendo assim a necessidade de se propôr um factor de forma para a radiação partícula / parede.

A análise do problema é no esquema Euleriano, em que a

observação incide sobre a partícula, não interessando o ponto em que ela se encontra na câmara de combustão. Há, no entanto, uma passagem para a análise Lagrangeana, pois determina-se, a partir da velocidade da partícula, a sua posição relativamente ao referencial fixo.

Para ser possível a interligação dos escoamentos partícula/ambiente, torna-se necessário conhecer a velocidade do escoamento e o arrasto produzido sobre a partícula. Para o cálculo das interligações mencionadas (a nível de escoamentos e também a nível de transferência de calor), será necessário fazer relacionar a cada partícula uma certa massa de ar, que será calculada na base da mistura estequiométrica (usando os coeficientes estequiométricos de queima) e do valor do excesso de ar declarado.

Da maneira acima descrita, conhecendo-se a composição da partícula e o excesso de ar, pode-se calcular a massa de gás referida a cada partícula, e com o valor da massa específica desse gás (ar), calcula-se o seu volume.

A velocidade inicial da partícula e do escoamento de ar primário e secundário estão definidos no programa, podendo ser mudados independentemente. Como este não é um parâmetro muito importante, o seu valor não é fornecido interactivamente, mas faz parte do programa.

Seria possível, mas demasiado teórico, chegar-se a uma expressão que desse o valor do factor de forma partícula/paredes para uma partícula central do "spray", a partir do conhecimento da distância entre partículas (função da massa específica do ar). Essa lei seria uma exponencial negativa (quando a massa específica tendesse para zero, o factor de forma tenderia para um).

Uma lei deste género foi testada, mas os resultados afastaram-se do previsível, provavelmente em virtude da inexistência de parâmetros práticos que a validassem. Assim usou-se, como já foi referido, um factor de forma constante.

Um outro requesito do programa, era o cálculo do valor do rendimento da queima ao fim de um certo comprimento de câmara, no sentido de se fazer uma análise paramétrica. O valor do rendimento da queima é calculado pelo quociente entre o calor libertado pelas matérias voláteis e por o carbono fixo, queimados até ao comprimento referido, com a quantidade de calor libertada, se esses componentes se tivessem queimado integralmente.

3.1.1 - Subrotinas principais

O programa é constituído por três subrotinas principais que correspondem a outros tantos modelos dos estágios declarados.

O algoritmo é descrito em função do tempo, sendo feita uma passagem por todo o programa em cada intervalo de tempo. No entanto essa passagem não engloba senão uma das subrotinas mencionadas, de cada vez, pois estas são chamadas em fases distintas do processo. Para essa selecção existem apontadores que não são mais que as quantidades de água e voláteis existentes na partícula. Enquanto existir líquido, será a evaporação a intervir. Depois de este se evaporar totalmente será a altura da desvolatilização e posteriormente dar-se-á a queima dos sólidos.

Mesmo parecendo artificial, esta análise não o é, pois as

temperaturas a que se desenvolvem cada fase são muito distintas: a evaporação até os 380K, a desvolatilização entre os 600K e os 950K e a queima a partir dos 1100K. Além destes valores que não são de maneira nenhuma rígidos, existe o facto, descrito por alguns autores [20,31], da não ocorrência simultânea de queima e desvolatilização, em virtude do oxidante não poder chegar à partícula, por ter sido integralmente gasto na frente de chama referente à combustão dos voláteis. Se o contrário fosse possível, então estes arderiam à superfície, onde são libertados e não na fase gasosa, como se verifica na prática.

3.1.2 - Subrotinas de apoio

Existem no programa cálculos que têm de ser elaborados uma ou mesmo várias vezes em cada passagem, como sejam o das propriedades físicas dos diversos elementos constituintes da partícula e do gás envolvente. Todos estes elementos aparecem também em subrotinas. Como estas propriedades são geralmente definidas em forma de tabelas, foi necessário, por ser computacionalmente mais "barato", fazer passar por os valores tabelados, curvas que tenham uma representação analítica simples.

As propriedades calculadas pelo programa são:

- pressão de saturação da água
- calor de vaporização da água
- calor específico do carvão
- calor específico da água
- calor específico do vapor de água (baixas temperaturas)
- calor específico do vapor de água (altas temperaturas)

- calor específico do ar
- calor específico do oxigénio
- calor específico do hidrogénio
- calor específico do dióxido de carbono
- calor específico do metano
- condutibilidade térmica do vapor de água
- condutibilidade térmica do ar
- viscosidade do ar
- difusibilidade do vapor de água no ar
- difusibilidade do oxigénio no ar
- massa específica do ar

Com excepção das três últimas propriedades, todas as outras são calculadas a partir de uma função cúbica em T (temperatura), que é o procedimento vulgarmente utilizado, [12], e no qual o erro máximo é geralmente inferior a 2% do valor correcto (tabelado). Os dados foram obtidos de tabelas termodinâmicas, já na forma de coeficientes [12], ou fazendo uma aproximação polinomial aos vários valores das propriedades [27].

O valor das difusibilidades é obtido a partir de uma formulação apresentada por Kanury [16]:

$$D = D_0 (T / T_0)^n$$

em que T_0 representa a temperatura de 298K, D_0 é um valor tabelado e o expoente n é variável com os elementos difundidos. Este expoente é também definido na mesma referência.

Em virtude do ar poder ser considerado um gás perfeito para as temperaturas em questão (superiores a 300K), optou-se pelo cálculo da sua massa específica a partir da conhecida equação dos gases perfeitos:

$$p \cdot v = R \cdot T$$

sendo p a pressão atmosférica, v o inverso da massa específica, R a constante dos gases perfeitos e T a temperatura absoluta.

Falta ainda falar sobre o cálculo das concentrações de oxigénio e das fracções mássicas de vapor de água. Como em cada iteração se conhece a quantidade existente de oxigénio, à volta de cada partícula, e o seu gasto, fácil será subtrair estes dois valores, para se conhecer em cada instante o quociente entre esta diferença e o valor da massa total de ar. A concentração obtém-se, multiplicando este valor pela massa específica. Para o cálculo das fracções mássicas, basta calcular a massa de vapor existente e dividi-la pela massa total de ar.

Nas referidas três primeiras subrotinas existem contadores que servem para que as saídas se deem somente entre um certo número de iterações. Doutra maneira apareceriam na listagem valores referentes a cerca de dez mil intervalos de tempo, o que é francamente desnecessário. Desta maneira a saída dos valores das propriedades dá-se entre cem ou mil ou um outro número de iterações.

Notou-se em algumas corridas do programa, principalmente para partículas de pequenas dimensões ou para valores excessivos ou deficitários de ar, que nas últimas iterações de cada rotina a taxa de libertação de vapor de água e de voláteis era relativamente elevada, o que implicava que o valor da massa retirada na última iteração fosse superior à existente. Um processo de eliminar esta ocorrência será diminuir o intervalo de tempo nessas circunstâncias.

Usa-se este procedimento nas subrotinas "evaporação" e "voláteis".

3.2 - Subrotina "evaporação"

A maior parte das equações diferenciais definidas no cap. 2.2 foi resolvida matematicamente, pelo que se torna fácil a sua implementação no programa de cálculo. Existe, no entanto, pelo menos duas equações que se apresentam na sua forma diferencial e assim terão de ser integradas numericamente.

O procedimento de cálculo desta subrotina encontra-se esquematizado no final do cap. 2.2.2. Como ali indica, ter-se-há de desenvolver o cálculo de oito equações sucessivas, pela seguinte ordem:

1 -cálculo da fração mássica de vapor a partir da temperatura da partícula

2 -cálculo do fluxo mássico de vapor Eq. (2.2.3)

3 -compensação do anterior devido ao escoamento Eq. (2.2.10)

4 -cálculo do coeficiente de transferência de calor Eq. (2.2.9)

5 -compensação do anterior devido ao escoamento Eq. (2.2.11)

6 -cálculo da massa de água evaporada Eq. (2.2.5)

7 -cálculo da transferência de calor

8 -determinação da nova temperatura da partícula Eq. (2.2.12)

-(voltar ao ponto 1).

A resolução das equações diferenciais (2.2.5) e (2.2.12) faz-se pelo método de Euler, em virtude de não haver necessidade de maior precisão. O uso de algoritmos mais exactos não incrementaria a precisão, em virtude do intervalo de tempo ser já suficientemente pequeno e seria mais consumidor de tempo de cálculo.

Para a parte decrescente da taxa de vaporização, a Eq. (2.2.3) é substituída pela Eq. (2.2.13), que necessita dumas

certas modificações:

de

$$\frac{dm}{dt} = \pi^2 D_{int} / (4 \cdot L_c^2) \cdot (m_p - m_\infty) \quad (2.2.13)$$

passará a

$$\frac{dG}{dt} = \pi^2 D_{int} / (4 \cdot L_c^2) \cdot (m_p - m_\infty) \cdot (V_a/A) \quad (3.2.1)$$

em que o m_p representa, como já foi visto, a fração mássica de água na partícula.

A Eq. (3.2.1) difere da anterior pelo último termo, que representa o quociente entre o volume de água existente na partícula (V_a) e a sua área superficial. Este termo tem como finalidade passar as unidades da Eq. (2.2.13) (kg/s), para as utilizadas no caso da taxa constante (kg/m².s).

Foram ainda definidas as variáveis apresentadas no cap. 2.2, cuja sequência é a seguinte:

- cálculo da saturação (quociente entre a massa de água actual e inicial)
- cálculo do volume de água inicial, que será o volume dos intertícios
- determinação da porosidade
- determinação do coeficiente de difusibilidade dentro da partícula
- cálculo do fluxo de vapor de água

Neste ponto dá-se a opção entre os dois mecanismos de secagem, taxa constante ou variável, que será escolhida consoante o valor mais baixo do fluxo de vapor, ou seja, faz-se a passagem da taxa constante para a decrescente quando os fluxos mássicos das duas expressões se igualarem.

3.3 - Subrotina "voláteis"

Nesta parte do programa considera-se que toda a água se encontra totalmente vaporizada e que somente os voláteis são queimados.

As primeiras linhas da subrotina são utilizadas na determinação do calor de combustão dos voláteis. Para isso calcula-se o calor de combustão do metano e do hidrogénio a partir dos valores à temperatura de 298K, no que são utilizados os coeficientes das curvas usados para o cálculo das capacidades caloríficas. A integração da Eq. (2.3.9), do capítulo 2, é efectuada por o método de Euler, chegando-se finalmente ao valor procurado, multiplicando os calores de combustão, pelas percentagens dos respectivos gases na atmosfera envolvente.

O cálculo da quantidade de voláteis a serem libertados em cada instante, é efectuado na subrotina "resolv", onde, também pelo método de Euler, se resolve a Eq. (2.3.3). Os valores das constantes de desvolatilização são calculados pela Eq. (2.3.2), como atrás tinhemos afirmado.

As equações de energia (2.3.4) e (2.3.6) são resolvidas pelo método Euler, com o intuito da quantidade de calor trocada por convecção entre a partícula e o ambiente ser a mesma, do lado da partícula e do lado do ar. A questão põe-se na maneira de as resolver simultaneamente. Se em cada instante de tempo, por exemplo, resolvéssemos a (2.3.4) (cálculo de T_o) e posteriormente a (2.3.6), a quantidade de calor trocada na convecção ($h.A.(T_o - T_w)$) não seria a mesma, pois o diferencial de temperaturas ($T_o - T_w$) seria diferente, em virtude de no primeiro cálculo se modificar o T_o . No presente caso calcula-se o calor

convectivo ($Q = A \cdot h \cdot (T_o - T_a) \cdot \Delta t$) que se subtrai e adiciona, respectivamente às equações da partícula e do gás.

Para que a conservação de massa se mantenha, a quantidade de voláteis libertada será adicionada à massa de ar que envolve a partícula e subtraída à massa da própria partícula.

Na subrotina é ainda calculado o coeficiente estequiométrico da queima dos voláteis, que permite chegar-se ao valor de oxigénio gasto. Este coeficiente é dado por uma média pesada dos coeficientes estequiométricos de massa das reacções de queima do metano (2.3.7) e do hidrogénio (2.3.8). A média é realizada tendo em conta a massa destes dois compostos na partícula.

3.4 - Subrotina "queima"

Quando a partícula de carbono arde, o calor proveniente da combustão é-lhe fornecido assim como aos produtos de combustão. Já no capítulo anterior (cap 2.4), se tinha referido que os produtos libertados teriam a mesma temperatura da partícula, sendo posteriormente juntos à restante massa de gás, de maneira a calcular a temperatura final da envolvente. Para isso será necessário resolver em primeiro lugar as equações de energia, que calcularão as temperaturas da partícula e do escoamento da maneira descrita no capítulo (3.3) e só depois se contabilizaria o calor de combustão. Assim nas equações (2.4.18 e 2.4.19) não aparecerá essa quantidade de calor, pelo que estas equações só serão calculadas em função da convecção e radiação.

A Eq. (2.4.20) aparecerá assim com um termo de fonte ($Q_q = G_f \cdot A \cdot H_c \cdot \Delta t$):

$$M_p \cdot C_{p_p} \cdot (T_f - T_o) + M_a \cdot C_{p_a} \cdot (T_o - T_f) = Q_q$$

Desta equação será possível calcular o valor de T_f , visto ser a sua única incógnita.

Pela mesma razão apontada na descrição da desvolatilização, o método de resolução das equações que tratam a transferência de calor, será o de Euler, mais uma vez para que a quantidade de calor em jogo entre a partícula e a atmosfera circundante tenha o mesmo valor.

Nesta rotina começa-se por calcular os kapas da reacção química, da transferência de massa na camada limite e da transferência de massa na casca de cinza. A expressão que nos dá

o primeiro, é dependente do valor do chamado módulo de Thiele. Por isso aparecem-nos duas expressões para o valor de k' .

O cálculo do k_c é imediato. No caso do k_d é necessário um processo iterativo em virtude do desconhecimento do valor da fração mássica do dióxido de carbono à superfície da partícula. Para isso na primeira passagem este considera-se zero e calcula-se o k_d pela Eq. (2.4.14). Seguidamente com a Eq. (2.4.17) determina-se o valor dessa fração mássica e calcula-se novamente o valor do k_d , e continua-se a iteração até que a diferença entre dois cálculos consecutivos seja pequena.

Em cada passagem, ao valor da massa da partícula e da massa de ar circundante, é subtraída e adicionada respectivamente, a quantidade de carbono consumido.

3.5 - Subrotina "velocidade"

Aquando da apresentação do problema proposto (Cap.1), mencionou-se que havia velocidade relativa partícula/escoamento, mas não se referiu o procedimento de cálculo.

Considera-se que existe velocidade inicial da partícula e do escoamento primário e secundário.

Denominando U a velocidade do ar em relação à câmara de combustão (referencial fixo), V a velocidade da partícula e v a velocidade relativa ($v = V - U$), e prevendo que o número de Reynolds do escoamento seja baixo ($Re \approx 1$), poderemos escrever uma expressão que nos dá o coeficiente de arrasto de uma esfera num escoamento laminar [1]:

$$Cd = 24/Re + 6/(1+Re)^{1/2} + 0.4 \quad (3.5.1)$$

e a força de arrasto será:

$$Fd = M_p \frac{dV}{dt} = M_p \frac{d(U+v)}{dt} \quad (3.5.2)$$

e por outro lado,

$$Fd = - Cd \cdot \rho \cdot v^2 \cdot Apr / 2 \quad (3.5.3)$$

sendo Apr a área projectada da partícula ($Apr = \pi \cdot r_p^2$)

Desprezando a gravidade e o efeito de gradiente de pressões na partícula e igualando as Eqs. (3.5.2) e (3.5.3):

$$\frac{dv}{dt} = - Cd \cdot \rho \cdot v^2 \cdot Apr / 2 - \frac{dU}{dt} \quad (3.5.4)$$

ou

$$\frac{dv}{dt} = - \left(6 \pi \cdot \mu \cdot r_0 / M_p \right) \cdot v - \left[\mu / (\mu + 2 \rho \cdot r_0 \cdot v) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot 3 \rho \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot v^2 / M_p - \\ - 0.2 \rho \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot v^2 / M_p - \frac{du}{dt}$$

em que r_0 representa o raio da partícula e os restantes símbolos resultam da definição do número de Reynolds ($Re = \rho \cdot v \cdot d / \mu$).

A variação da velocidade do escoamento com o tempo, dá-se devido à diminuição da sua massa específica com o aumento de temperatura. Em virtude de se considerar a câmara de dimensões constantes no sentido axial (seção constante), um incremento de volume de um elemento de volume, leva à sua expansão no sentido longitudinal:

$$\frac{du}{dt} = \frac{d(1/\rho)}{dt}$$

Assim e linearizando os valores de ρ em cada unidade de tempo,

$$\Delta u / \Delta t = \Delta V_{ol} / \Delta t = \Delta (1/\rho) / \Delta t = (1/\rho_{in} - 1/\rho_i) / \Delta t \quad (3.5.5)$$

que será introduzido na Eq. (3.5.4).

Em virtude da fórmula (3.5.5) ser implícita, o que implica a previsão de T_{in} e de v_{in} , é preferível usar-se o instante de tempo anterior e o actual ($i-1$ e i), de maneira a explicitar a expressão. Desta maneira perde-se um pouco de precisão, mas ganha-se substancialmente no tempo de cálculo.

Para a resolução da Eq. (3.5.4) usa-se um método de Runge-Kuta de quarta ordem [8]:

$$k_1 = f(v_i)$$

$$k_2 = f(v_i + \Delta t \cdot k_1 / 2)$$

$$k_3 = f(v_i + \Delta t \cdot k_2 / 2)$$

$$k_4 = f(v_i + \Delta t \cdot k_3)$$

$$v_{ti+1} = v_i + (\Delta t / 6) \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

Tenta-se assim, incrementar um pouco a precisão.

Seria possível, no entanto, resolver a equação em causa por um método exacto (integração matemática), mas persistiria o seu carácter implícito e o tempo de cálculo seria incrementado devido à existência de exponenciais na solução exacta.

3.6 - Escolha do intervalo de tempo

No trabalho proposto, impôs-se uma condição que consistia em procurar-se fazer um programa relativamente pouco pesado, para ser utilizado interactivamente em computadores de pequena ou média capacidade, como é o caso do Eclipse MV8000.

Foi assim procurado um intervalo de tempo que não fosse suficientemente grande de maneira a não obrigar a um dispêndio exagerado de tempo em frente ao computador na espera de resultados, mas que por outro lado não fosse excessivamente pequeno de maneira a falsear os resultados. Optou-se, nesta perspectiva, por o valor de $1E-4$ s (décima milésima parte do segundo).

Existem, no entanto, situações em que este intervalo de tempo é ainda excessivo, como na parte final da desvolatilização em que a grande quantidade de voláteis libertados obriga a que o incremento da temperatura seja enorme em cada passagem, o que implica uma diminuição de precisão. Por vezes, a própria quantidade de voláteis na partícula caía para valores inferiores a zero, em virtude do intervalo de tempo. Assim tornou-se necessário diminuí-lo sempre que o incremento de temperatura no intervalo anterior fosse superior a um dado valor.

Para o intervalo de tempo escolhido, o tempo de C.P.U. no computador MV8000 ronda os três minutos para o exemplo base, sendo bastante superior noutras casos. Obviamente que para um intervalo dez vezes mais pequeno o tempo total seria aproximadamente de meia hora o que além de excessivo, não é permitido em programas interactivos.

Como se referirá mais tarde na análise de resultados, o

valor do intervalo de tempo escolhido não afecta significativamente o resultado final, se o compararmos com resultados obtidos para intervalos mais pequenos (cerca de 0.1%). No entanto a diferença, para intervalos da ordem de dez vezes maiores é já notória, pelo que o intervalo escolhido será como que um mínimo.

Ainda com a mesma preocupação do tempo de cálculo, tentou-se minimizar, sempre que possível, os cálculos grandemente consumidores, como sejam os exponenciais e os logaritmos. Em virtude dos métodos de integração numérica mais exactos (preditores correctores) serem mais pesados computacionalmente e dado o intervalo de tempo ser suficientemente pequeno na duração total do processo (são necessárias cerca de dez mil iterações), usou-se o mais possível um método simples como o de Euler.

CAPITULO 4 -- RESULTADOS E ANALISE PARAMETRICA

Como não podia deixar de ser, os resultados que aqui se apresentam são devidos a várias passagens do programa anteriormente descrito. Procurou-se alterar parâmetros que evidenciem o comportamento da queima a diversas situações, tais como diâmetro das partículas, temperaturas das paredes e do ar de combustão, tipo de carvão e outros, no intuito de determinar as condições óptimas para a queima.

Como já foi referido, este tipo de combustível pode ser utilizado praticamente nas mesmas situações de queima das óleos pesados, exceptuando-se o caso de motores e turbinas em virtude dos depósitos de cinza serem bastante abrasivos para as partes móveis. Fica-se, então, com a possibilidade de o utilizar em instalações de queima tipo caldeiras. Tem, no entanto, um inconveniente relativamente aos derivados do petróleo no tocante ao tempo de permanência (e consequentemente na extensão da câmara) e à maior facilidade de extinção de chama.

Foram postos em evidência os tempos necessários a cada fase da queima, ou seja à evaporação, à desvolatilização e à queima. Paralelamente foram determinadas as temperaturas máximas atingidas quer pela partícula, quer pelo escoamento.

Mercê do mecanismo de radiação ser pouco elaborado, este programa apresenta certas limitações para situações em que ele é importante, como seja o caso da variação de tamanho das partículas ou temperaturas de parede muito diferentes das de combustão. As razões pela qual o modelo de radiação não poder ser mais realista, prendem-se com a necessidade dum modelo numérico relativamente pouco pesado e assim não se poder

introduzir radiação partícula/partícula. Uma outra razão deve-se à inexistência de um processo de cálculo do factor de forma, como foi explicado no cap.2.

Nos próximos subcapítulos apresentar-se-ão as condutas dos diversos parâmetros estudados relativamente ao tempo de permanência e ao comprimento de câmara necessário para se atingir um dado rendimento (no caso presente este considerou-se de 90%), assim como às temperaturas máximas da partícula e do escoamento.

Como em qualquer estudo paramétrico, escolheu-se um caso de referência, que se determinou, escolhendo valores médios dos apresentados em artigos sobre o assunto. O slurry de referência apresenta a seguinte composição:

H ₂ O	- 35%
voláteis	- 20%
carbono fixo	- 40%
cinza	- 5%

Outros valores relativos à queima, no caso de referência:

diâmetro	- 70 microns
T do ar prim.	- 700 K
- T do ar sec.	- 700 K
T da parede	- 1000 K
T da part.	- 293 K
Vel. da part.	- 6 m/s
Vel. do ar	- 5 m/s
Pressão	- atmosférica
Factor de forma	- 0.7

Absorssividade da part. - 0.85

Emissividade da parede - 1

Composição do ar

oxigénio - 23.2%

azoto - 76.1%

vapor - 0.7%

Composição dos voláteis

CH₄ - 50.9%

H₂ - 13.2%

Calor de combustão dos voláteis a T=298 K

CH₄ - 50.18E6 J/kg

H₂ - 121E6 J/kg

Calor de combustão do carbono fixo - 25E6 J/kg

Parâmetros relacionados com as equações de Arrhenius (desvolatilização e queima) - ver capítulo 2

Quantidade de ar - estequiométrica

Para o caso de referência acima descrito, traçou-se a curva das temperaturas da partícula e do escoamento vs posição da partícula na câmara. Este gráfico aparece na fig.16, que passarei a descrever.

Existem duas tonalidades nesta figura, uma relativa à partícula (mais escura) e outra relativa ao escoamento, como aliás se poderá identificar no próprio gráfico pela legenda. A

curva mais escura é continua, enquanto que a relativa ao escoamento apresenta uma descontinuidade para um valor de, aproximadamente, 0.3 metros. Esta distância corresponde à injecção do ar secundário, ou seja, o final da evaporação do slurry. A descontinuidade da curva existe, em virtude das temperaturas do ar secundário nesse momento injectado e do que estava na câmara e tinha servido para a evaporação, serem diferentes e a transição se dar praticamente instantaneamente nessa posição.

A curva da partícula apresenta a tendência que se esperava, com um patamar inicial onde se dá a evaporação, seguindo-se uma elevação brusca de temperatura, derivada da injecção do ar secundário, a que se segue um tramo com grande elevação de temperatura, na altura da libertação e queima dos voláteis. Posteriormente dá-se a queima do carbono fixo, sendo neste caso a libertação de calor menos intensa que na desvolatilização, o que dá origem a uma curva menos pronunciada. Durante esta primeira parte da queima, a temperatura da partícula é superior à do escoamento, em virtude da combustão se dar à superfície da partícula, o que não acontecia no caso da combustão dos voláteis, em virtude destes arderem longe da partícula. Na parte final da queima, em virtude de não existir muito oxigénio no ar envolvente, o ritmo de queima baixa, começando a temperatura da partícula a baixar. Este abaixamento de temperatura é devido à quantidade de calor presente na radiação entre a partícula e a parede, ter um valor superior ao da quantidade de calor produzida pela combustão.

A fase de combustão descrita no final do anterior parágrafo, corresponde na fig.16 à parte do lado direito, em que a temperatura do escoamento é superior à da partícula.

Na fig.17, pode-se comparar o andamento das curvas das temperaturas, com as das quantidades de água, voláteis, oxigénio e carbono fixo, referidas à mesma escala de comprimentos. Aí se poderá identificar o início e fim de cada fase: a de evaporação acaba com a extinção da água, que marca o começo da desvolatilização. Esta fase dura até que a quantidade de voláteis desça para um valor próximo de zero, altura em que começa a queima. Como se tinha atrás referido, a divisão nas ditas fases não tem muito de artificial, pois verifica-se que o consumo tanto de voláteis como de carbono, é reduzido no início de cada uma.

4.1 - Excesso de ar

Como foi atrás dito, o cálculo da quantidade de ar a ser injectada na câmara, é referida a uma partícula, e tem a ver com a sua massa de voláteis, de carbono fixo e com o excesso de ar considerado. Relativamente ao quociente massa de ar / massa da partícula, o cálculo é efectuado por meio dos coeficientes estequiométricos de massa das reacções de combustão em causa. No caso do excesso de ar, a quantidade de ar atrás referida é multiplicada por um factor que a tenha em linha de conta. Por exemplo, para um excesso de ar de 20%, multiplica-se a quantidade de ar estequiométrico por 1.2. Neste caso a riqueza da mistura (quociente entre os quocientes [massa de ar / massa de carvão] entre o caso estequiométrico e o real) seria de 1.2.

Foram feitas passagens do programa para valores de riqueza compreendidos entre 0.8 e 1.4 (excessos de ar desde -20 a +40%), visto ser nesta gama de valores que vulgarmente se queima o carvão. Para esses valores de excesso de ar, apresenta-se na fig.1 a configuração das linhas temperatura/exc.de ar. São apresentadas duas curvas de temperatura: uma correspondente à partícula (de valores mais elevados e de tonalidade mais escura) e outra correspondente ao escoamento. Nota-se que as temperaturas máximas ocorrem para valores próximos de excesso de ar nulo, sendo o maior valor verificado para uma mistura com -1% de excesso de ar (lado de mistura rica), como se pode verificar pela fig.18.

Quanto ao tempo de ocorrência das diferentes fases (fig.6), nota-se que as curvas de evaporação (a inferior) e de desvolatilização (marcada com círculos) são levemente

decrecentes com o aumento do excesso de ar, o que facilmente se explica, sabendo que quanto maior for a massa de ar mais facilmente se dá a secagem e mais facilmente se realiza o aquecimento da partícula e com isso a sua desvolatilização.

Devo deixar, aqui, explícito que a denominação dada à fase de desvolatilização compreende não só essa parte, mas também o pré-aquecimento da partícula, que lhe permite atingir a temperatura de produção de voláteis e da sua combustão. O tempo necessário para o aquecimento é francamente mais longo que o devido à desvolatilização, não sendo assim possível tirar elacções sobre a sua duração, a partir dos resultados aqui apresentados.

No que respeita à queima (terceira linha a contar de baixo, marcada com quadrados), a curva apresenta um andamento mais complicado, que passarei a descrever. Para valores de excesso de ar positivos, apresenta um mínimo para valores à volta de 10. Para valores superiores a esse, a maior massa de ar é dificilmente aquecida, sendo a sua temperatura máxima mais baixa, o que implica uma menor velocidade de combustão, atrasando assim o processo. Para valores próximos do zero, a quantidade de oxigénio no final da queima é baixa, implicando assim tempos mais elevados. Para misturas ricas, o tempo de queima vai baixando com o aumento da riqueza, em virtude da quantidade de ar a aquecer ser mais pequena e devido à combustão da partícula não se dar integralmente, visto não haver oxigénio para isso. Assim para valores de excesso de ar negativos, a diminuição do tempo de queima deve-se ao facto de não se queimar todo o combustível, penalizando assim o rendimento.

A curva do tempo de permanência total (a superior), é dada pela soma das outras três e assim apresenta sensivelmente o

andamento da da queima, com uma leve inflecção para a direita no que respeita aos tempos mínimos. Esta correção é introduzida pelas duas primeiras curvas, mas não torna relevante a diferença entre as tendências da queima e da globalidade.

A fig.12 dá-nos uma visualização do comprimento que deverá ter a câmara de combustão, para que a partícula queime a 90%. Para estas condições, os resultados apontam para um comprimento mínimo situado para valores de excesso de ar compreendidos entre 2 e 6%. Esta análise afigura-se mais importante que a fornecida pelo tempo total de queima, visto a extensão da câmara ser um factor dominante nas instalações de queima. Ainda sobre esta figura, deve-se referir o facto de para valores de excesso de ar muito negativos (menores que -6), não se obtiveram valores em virtude da queima se dar com um rendimento inferior ao preconizado para este caso (90%).

Assim, para termos uma combustão completa, no mínimo espaço, a temperatura o mais elevado possível e de acordo com o presente estudo, deve-se usar um excesso de ar entre 0 e 5%. Dentro destes valores teremos a certeza de ter uma câmara de combustão relativamente curta e a temperatura das partículas ser elevada, além de haver oxigénio para ultimar a queima completamente.

Na fig.6 aparece a indicação que uma parte dela (a esquerda), apresenta queima incompleta. Este domínio corresponde a misturas ricas, nas quais o oxigénio existente não é suficiente para queimar a globalidade da partícula. Por globalidade da partícula entende-se a parte combustível, ou seja o carvão seco e sem cinza (dry ash free).

4.2 - Diâmetro da partícula

Foram ensaiados valores de diâmetros compreendidos entre 25 e 150 microns, em virtude de serem estes os geralmente encontrados na prática [3,39]. Em virtude das temperaturas das partículas de maior diâmetro baixarem grandemente no final da queima, não foi possível obter a sua combustão completa, pelo que os tempos totais e de queima não aparecem especificados para valores de diâmetros superiores a 110 microns.

O tempo total de queima segue, com grande aproximação uma função quadrática, como seria de esperar (fig.11). Assim pode-se comprovar a afirmação [22], em que o tempo de queima varia com o quadrado do diâmetro da partícula.

As curvas que dão o tempo de queima de cada fase com o diâmetro, estão representadas na fig.7, onde se reconhece, de baixo para cima, a de evaporação (representada por estrelas), a de desvolatilização (círculos), a de queima (quadrados) e a global (pontos). Como se pode verificar, as curvas da secagem e da queima seguem, aproximadamente, quadráticas, enquanto que a de desvolatilização se aproxima duma recta.

No respeito às temperaturas máximas, pela fig.2 pode-se constatar que quanto mais pequena for a partícula, maior estas serão, de acordo com o previsto, visto que para esferas, o quociente área/volume é inversamente proporcional ao valor do raio. Para partículas pequenas este quociente é superior ao das grandes, o que implica que a combustão e a transferência de calor se deem mais facilmente e consequentemente as temperaturas alcançadas sejam mais elevadas.

A curva representativa do comprimento da câmara, aparece na

fig.13 e, que tal como a referente ao tempo, segue com grande aproximação uma função quadrática.

Assim, há sempre interesse em injectar partículas o mais pequenas possível, de maneira a que o local de queima tenha as dimensões minimizadas.

4.3 - Variação na composição do slurry

Foram testados vários tipos de composição de slurry quanto à sua constituição. Fizeram-se variar as quantidades de água, de voláteis, de carbono fixo e de cinza, para que os resultados servissem para conhecer a influência desses parâmetros, mas muitos outros parâmetros intervieram, como seja o caso das diferentes massas específicas e capacidades caloríficas, entre os elementos constituintes, sendo difícil a exacta explicação das alterações alcançadas. Assim transcreve-se abaixo os resultados obtidos, tentando explicar posteriormente a sua razão de ocorrência:

SLURRY	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<hr/>									
COMPOSICAO	-----								
H ₂ O	35	35	35	29	41	35	35	28	41
Voláteis	20	25	18	23	17	17	22	26	21
Carbono	40	35	42	43	37	37	42	44	28
cinza	5	5	5	5	5	11	1	1	10
<hr/>									
T _c (K)	1657	1668	1638	1666	1634	1625	1671	1684	1648
T _w (K)	1641	1652	1625	1649	1621	1612	1654	1667	1633
t _c (s)	.877	.788	1.008	.820	1.049	1.018	.838	.791	.819
t _w (s)	.068	.061	.071	.063	.138	.084	.061	.039	.132
t _f (s)	.242	.236	.246	.238	.306	.274	.226	.187	.322
t _r (s)	.567	.491	.692	.518	.605	.660	.551	.565	.365
l (m)	3.65	3.07	4.34	3.24	4.50	4.30	3.39	3.01	3.36

O slurry 1 é considerado de referência e foi modificando

esta composição que se fizeram todos os testes anteriores.

Usou-se em todos os testes a quantidade estequiométrica de ar.

Dos slurries 2 para o 3, aumentou-se a quantidade de carbono fixo, diminuindo-se a de voláteis. Com esta mudança todas as características da queima pioraram, ou seja, aumentou o tempo de queima, o comprimento necessário e diminuíram as temperaturas máximas, tanto da partícula como do escoamento.

Dos slurries 4 para o 5, aumentou-se a percentagem de água existente, do que adveio um aumento significativo (para o dobro) do tempo de evaporação, aumentando também, os tempos das outras fases, em virtude da temperatura no final da evaporação ser mais baixa para o caso 5. Nas temperaturas máximas houve também diferenças, sendo as mais elevadas atingidas pela mistura com menos água.

Nos slurries 6 e 7, mudou-se a percentagem de cinza, tendo todas as propriedades piorado no caso 6, que era o de maior quantidade de cinza. Este procedimento não é de estranhar, pois a densidade da cinza é superior à dos outros constituintes, o que origina uma maior massa para aquecer com menor quantidade de combustível disponível.

4.4 - Temperatura do ar primário e secundário

Em virtude da velocidade se considerar constante para todos os casos e de a massa específica do ar variar com a temperatura, repare-se que estamos a jogar com potências diferentes se alterarmos a temperatura de entrada dos gases, visto a pressão ser a mesma. No entanto, no caso presente isso não se verifica visto não se considerar o sistema como um todo, mas somente se usar uma partícula e o seu ar correspondente. Para termos uma possível comparação física com o presente modelo, pode-se considerar que a variação da temperatura do ar de entrada, que origina uma menor massa específica, é compensada por maiores dimensões de câmara, de maneira a que a potência instalada não se modifique.

Como nos casos anteriores, apresentam-se três figuras com o comportamento do slurry às modificações introduzidas no ar de combustão, tanto primário como secundário.

Em relação às temperaturas máximas, a fig.3 mostra-nos uma curva crescente com o crescimento da temperatura do ar injectado. Esta evolução é a esperada, visto que se as temperaturas de entrada são mais elevadas é lógico que as finais o sejam também. No entanto a diferença entre os valores extremos de temperaturas máximas, não é tão elevado como nos casos anteriores.

Em relação à fig.8, que nos dá o tempo total de queima função da temperatura de entrada do ar, também não há nada a acrescentar, pois a evolução é a esperada, sendo as curvas descendentes com o elevar da temperatura, assim como acontece com a fig.14, que relaciona o comprimento de queima com a temperatura do ar.

4.5 - Temperatura da parede

Este parâmetro é, de todos, o que menos tem correspondência na prática, pois é difícil numa instalação de queima modificá-lo. Era, no entanto necessário escolher uma temperatura para a parede e assim sendo, fizeram-se variações do seu valor. A variação deste parâmetro tem interesse na validação do algoritmo. No caso presente, como não é possível a validação, optou-se por um valor médio dos encontrados em artigos deste assunto.

A nota de maior realce reside no facto de não se conseguir queimar todo o carbono existente, para valores de temperatura inferiores a 850K. A razão é que para este nível de temperaturas, na parte final da queima a temperatura desce para valores inferiores a 1100K, que praticamente limitam a combustão de se dar.

Convém ainda acrescentar, que a diferença entre os casos extremos influencia pouco os resultados.

4.6 - Temperatura da partícula no momento da sua injeção

A dependência da variação das propriedades com este parâmetro é praticamente inexistente, como se pode inferir das figs. 5, 10 e 15. Nesses diagramas, na mesma escala dos correspondentes anteriores, encontramos praticamente rectas horizontais, andamento totalmente diverso dos anteriores. De qualquer maneira poderemos dizer que as características melhoram com o aumento de temperatura da partícula.

Uma razão da horizontalidade das linhas, assenta no facto das temperaturas não poderem variar muito, pois estão limitadas inferiormente pela temperatura ambiente (293K) e superiormente pela ebullição da água (373K). Este diferencial (80K) é claro que não poderá ter a mesma influência que, por exemplo, o da temperatura do ar (300K).

4.7 - Eleição dos parâmetros mais importantes

Pela análise das figs.19, 20 e 21, constata-se que as maiores diferenças das propriedades ocorrem para as modificações do excesso de ar e dos diâmetros. Fora estes dois parâmetros, a temperatura do ar de combustão é, dos restantes, o mais importante, sendo a temperatura da partícula o que menor influência exerce.

Nas figuras consideradas não se incluiu a modificação das características constitutivas das partículas, sendo este um outro parâmetro importante na combustão. Malgrado, é muito difícil a sua apreciação, razão pela qual não se pode traçar gráficos das suas evoluções.

Assim, como já atrás foi dito, deve-se escolher um excesso de ar e diâmetros para as partículas que fornecam a possibilidade de uma combustão nas melhores condições, pois é com estes parâmetros, além das características do carvão, que mais directamente se modifica a conduta da queima.

Quanto ao efeito do intervalo de integração, logo que ele seja inferior a $1E-4$ segundos, a diferença não é significativa. No entanto para valores mais longos, já se nota uma diferença significativa. Assim deve-se usar esse intervalo, em virtude de um mais pequeno trazer incorrecções e de um maior, penalizar o tempo de cálculo:

O efeito da velocidade inicial dos gases e das partículas, praticamente não se faz sentir ao nível das temperaturas máximas ou do tempo de permanência, pelo que se pode praticamente desprezar o seu efeito.

CAPITULO 5 -- CONCLUSOES

Os resultados apresentam-se da forma esperada, descrevendo, de uma forma geral, bem o processo, sendo possível tirar conclusões acerca da maneira de queimar a mistura de carvão com água, denominada slurry.

Este combustível queima tão bem e praticamente nas mesmas condições do carvão pulverizado, ocorrendo numa penalização inferior a 5%, em termos de calor, se o compararmos com carvão seco. Por outro lado, tem-se o benefício de se tratar de um combustível líquido, com todas as vantagens daí decorrentes, como a facilidade de transporte em "pipe-lines" e armazenamento. No entanto, a penalização em tempo e dimensões da câmara de combustão, relativamente aos outros combustíveis líquidos (hidrocarbonetos), é mais notória, havendo necessidade, neste caso, de mais extensas dimensões para a queima.

Interessa-nos, assim, determinar características que nos permitam minimizar essa permanência na câmara de combustão. No cap. 4 já se esboçaram as principais tendências que deve ter a queima destes combustíveis nesse sentido e que se poderão sumariar da seguinte forma:

- excesso de ar entre 0 e 5 %
- partículas o mais pequenas possível
- o carvão escolhido deverá apresentar pouca cinza e elevada percentagem de matérias voláteis
- temperatura do ar primário e secundário o mais elevado possível
- temperatura das paredes da câmara elevada

- a menor percentagem possível de água, mas de maneira a que propriedades de fluido do combustível se mantenham, de modo a poder ser bombeado e injectado como um líquido
- temperatura de entrada da partícula relativamente elevada

Os parâmetros acima apresentados, estão dispostos por ordem decrescente de importância, tanto ao nível da duração da queima, como ao nível das temperaturas máximas. Temos, assim, que os mais importantes são os relacionados com o excesso de ar, com as dimensões da partícula e com a temperatura do ar de combustão, sendo a estes que se deve dar mais relevo em posterior estudo experimental, além da devida ênfase às propriedades do carvão.

O facto de não haver possibilidade de validação, deixa este trabalho com uma função como que de vanguarda relativamente a posteriores estudos numéricos, sendo, assim necessário deixar descritas "linhas de conduta", que possam auxiliar um possível seguidor.

Neste sentido deixei descritas no cap.2, as várias propriedades que se deverá tentar medir, de maneira a validar convenientemente este modelo, e assim ele poder ser uma ferramenta verdadeiramente indispensável no estudo da queima de slurries de carvão e água. Repetindo a lista do capítulo referido, as características a medir seriam:

- temperatura do gás
- velocidade do gás
- composição do gás (percentagem de oxigénio, vapor de água, etc.)
- temperatura das partículas
- velocidade das partículas

- dimensões das partículas
- densidade aparente das partículas
- composição das partículas (percentagem de água, voláteis, carbono fixo e cinza)
- temperaturas das paredes
- propriedades das paredes (à radiação)
- valor do fluxo de radiação
- distribuição do tamanho das partículas, na injeção

Estas seriam as medições que teriam lugar num estudo prático, sendo todas, com exceção da última, medidas ao longo da extensão da câmara, como aconteceu com os resultados deste estudo.

CAPITULO 6 -- BIBLIOGRAFIA

- [1] - Antony,D.B., Howard,J.B., Hottel,H.C. and Meissner,H.P., "Rapid Devolatilization of Pulverized Coal", Fifteenth Symposium (International) on Combustion, 1303-1317, (1975)
- [2] - Arthur,J.R., "Reactions Between Carbon and Oxigen", Transactions of Faraday Soc. , 42, 164-178, (1951)
- [3] - Bird,R.B. et al., "Transport Phenomena", John Wiley & Sons (1960)
- [4] - Bomo,N., Lahaye,J. et Prado,G., "Formation de Cénosphères au Cours de la Pyrolyse de Fuels Résiduels", Revue Générale Thermique, 274, 561-568, (1984)
- [5] - Chung,J.N., "A Numerical Model of Coal/Hydrocarbons Droplet in Spray Combustion", 22nd Aerospace Sciences Meeting, AIAA-84-0039 (1984)
- [6] - Faeth,G.M., "Evaporation and Combustion Sprays", Prog. Energy Combustions Science, 9, 1-76, (1983)
- [7] - Faeth,G.M. and Lazar,R.S., "AiAA J. , 9, 2165, (1971)
- [8] - Ferziger,J.H., "Numerical Methods For Engineering Applications", John Wiley & Sons, (1981)

- [9] - Field,M.A. et al., "Combustion of Pulverized Coal", The British Coal Utilization Reserch Association, (1967)
- [10]- Froelich,D., Corbel,S., et Prado,G., "Etude Expérimentale et Modélisation de la Combustion d'un Grain de Charbon", Revue Générale Thermique, 274, 569-573, (1984)
- [11]- Glassman,I., "Combustion", Academic Press, (1977)
- [12]- Hamblin,F.D., "Abridged Thermodynamic and Thermochemical Tables", Pergamon Press, (1981)
- [13]- Hwang,L.K. and Han,R.X., "Slurry Droplet Combustion", 22nd Aerospace Sciences Meeting, AIAA-84-0042, (1984)
- [14]- Incropera,F.P. and De Witt,D.P., "Fundamentals of Heat Transfer", John Wiley & Sons, (1981)
- [15]- "Industrial Energy Conservation Course", prepared by NIFES and E/DI EUROPE, February, (1985)
- [16]- Kanury,A.M., "Introduction to Combustion Phenomena", Gordon and Breach, (1975)
- [17]- Kobayashi,H., Howard,J.B. and Sarofim,A.F. , "Coal Devolatilization at High Temperatures", Sixteenth Symposium (International) on Combustion", 411-425, (1977)

- [18]- Law,C.K., Law,H.K., and Lee,C.H., "Combustion Characteristics of Coal/Oil/Water Mixtures", Energy, 4, 329-340, (1979)
- [19]- Levenspiel,O., "Chemical Reaction Engineering"
- [20]- Lockwood,F.C., Salooja,A.P. and Syed,S.A., "A Prediction Method for Coal-Fired Furnaces", Combustion and Flame, 38, 1-15, (1980)
- [21]- "Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers", McGraw-Hill Book Company, (1981)
- [22]- McHale, E.T., Scheffee,R.S. and Rossmeissl,N., "Combustion of Coal/Water Slurry", Combustion and Flame, vol 45, 121-135, (1982)
- [23]- Okazaki,M., Yamasaki,T. and Toei,R., "Prediction of Drying Time of Wet Granular Bed by Conductive-Heating", 3th Symposium of Drying Technology, 457-466, (1982)
- [24]- Pita,G., "Droplet Size Distribution and Liquid Volume Concentration in a Water Spray", in AGART, Oct (1983)
- [25]- Ragland,K.W., Juhn,T.C. and Yang,J.T. , "Coal Combustion at High Reynolds Number", Eighteenth Symposium (International) on Combustion, 1295-1303, (1981)
- [26]- Ranz,W.E. and Marshall,W.R., Chemical Eng. Prog., 48, 141-146, 173-180, (1952)

- [27]- Raznjevic,K., "Tables et Diagrammes Termodinamiques", traduit du serbo-croate, edition Eyrolles, (1970)
- [28]- Shishido,I., Suzuki,M. and Ohtani,S., "Critical Moisture Content for Time Dependent Drying Condition", 3th Symposium of Drying Technology, 165-177, (1982)
- [29]- Siegel,R. and Howell,J.R., "Thermal Radiation Heat Transfer", McGraw-Hill, (1981)
- [30]- Smith,P.J., Fletcher,T.H. and Smoot,L.D., "Model for Pulverized Coal-Fired Reactors", Eighteenth Symposium (International) on Combustion, 1285-1211, (1981)
- [31]- Smith,P.J. and Smoot,L.D., "One-Dimension Model for Pulverized Coal Combustion and Gasification", Combustion Science and Technology, 23, 17-31, (1980)
- [32]- Smoot,L.D., "Modeling of Coal-Combustion Processes", Prog. Energy Combustion Science, 10, 229-272, (1984)
- [33]- Smoot,L.D., "Pulverized Coal Diffusion Flames", Eighteenth Symposium (International) on Combustion, 1185-1202, (1981)
- [34]- Spalding,D.B., "Combustion and Mass Transfer", Pergamon Press, (1979)
- [35]- Szekely,G.A. and Faeth,G.M., "Combustions Properties of Carbon Slurry Drops", AIAA J., 20, 422-429, (1982)

- [36]- Szekely,G.A. and Faeth,G.M., "Reaction of Carbon Black Slurry Agglomerates in Combustion Gases", Nineteenth Symposium (International) on Combustion", 1077-1085, (1982)
- [37]- Szekely,J., Evans,J.W. and Sohn,H.Y., "Gas Solid Reactions", Academic Press, (1976)
- [38]- "Technical Data on Fuel", edited by Brit. Nat. Comm. of World Conference, (1977)
- [39]- Turns,S.R. and Faeth,G.M., "A One Dimension Model of a Carbon-Black Slurry-Fueled Combuster", 22nd Aerospace Meeting, AIAA-84-0126 (1984)
- [40]- Ubhayakar,S.K.; Stickler,D.B., Rosenberg,Jr. and Gannon,R.E., "Rapid Devolatilization of Pulverized Coal in Hot Combustion Gases", Sixteenth Symposium (International) on Combustion, 427-436, (1977)
- [41]- Unger,R.E. and Suuberg,E.M., "Modeling the Devolatilization of a Softening Bituminous Coal", Eighteenth Symposium (International) on Combustion, 1203-1211, (1981)
- [42]- Vermersch,M.A., "La Combustion Simultanée du Gaz Naturel et du Charbon Pulvérisé", Revue Générale Thermique, 274, 543-560, (1984)
- [43]- Wallis,G.B., "One Dimensional Two Phase Flow", McGraw-Hill (1969)

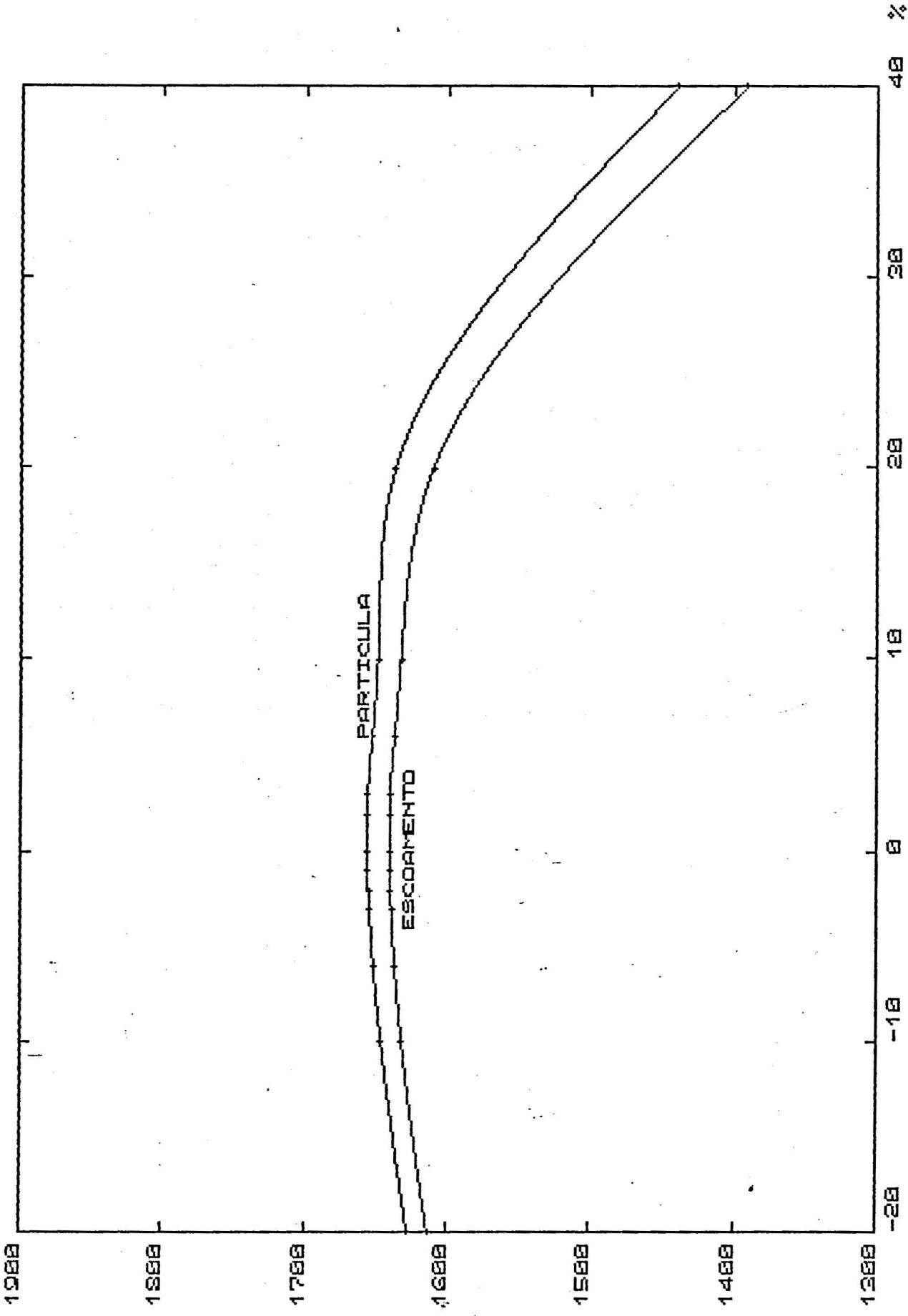


FIG. 1 TEMPERATURAS MÁXIMAS X EXCESSO DE AR

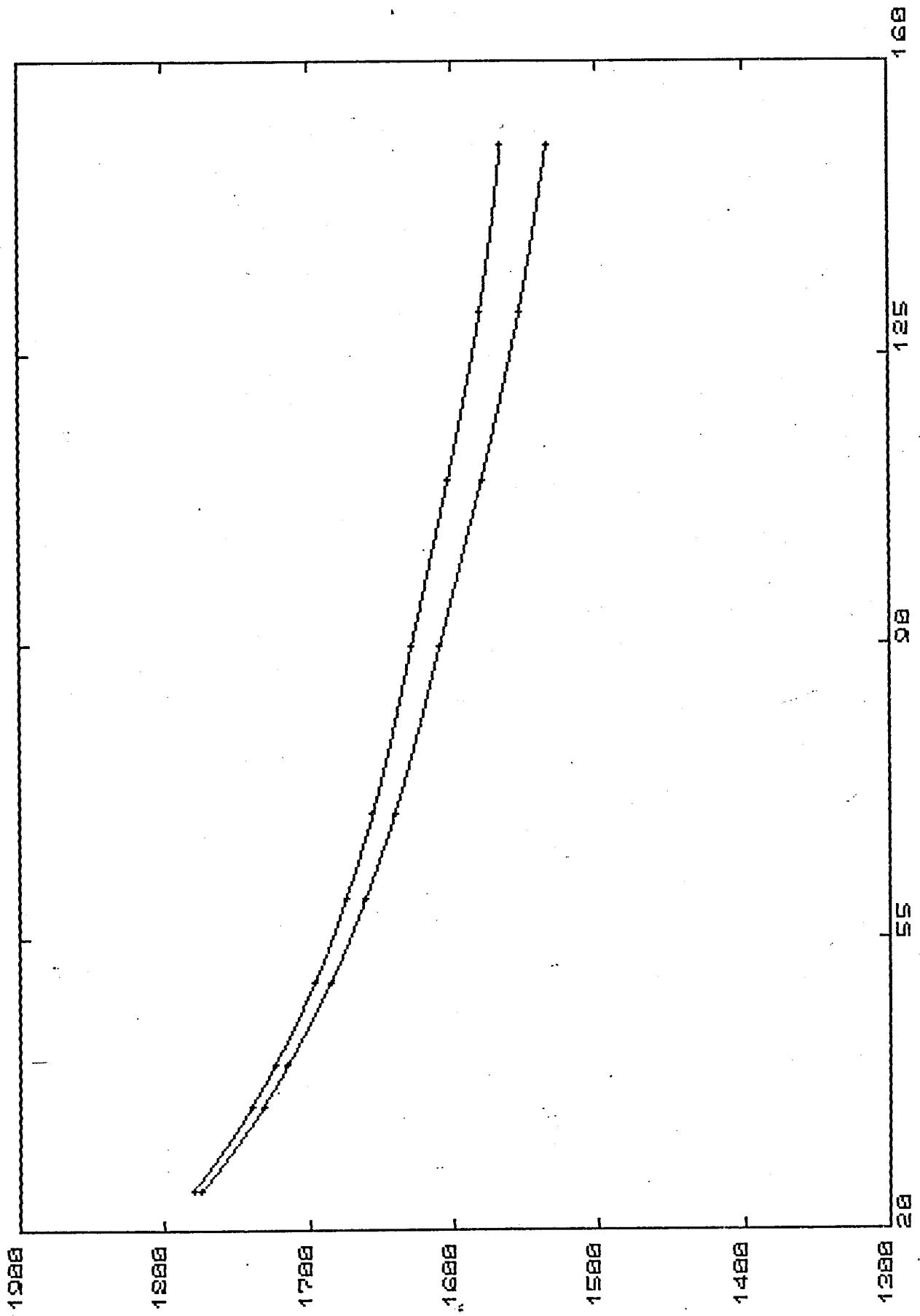
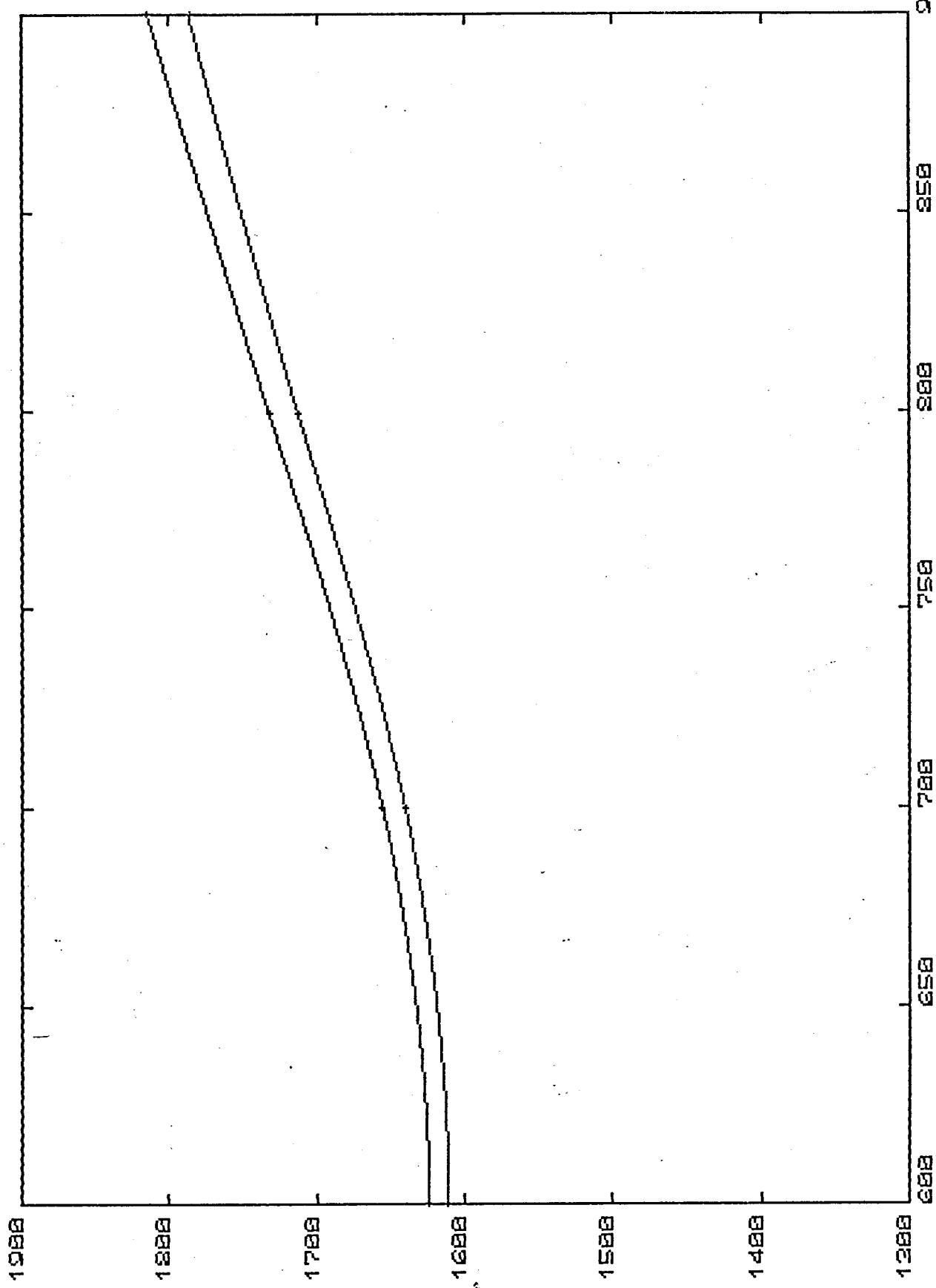


FIG. 2 TEMPERATURAS MÁXIMAS X DIÁMETRO

FIG. 2 TEMPERATURAS MÁXIMAS - TEMPERATURA DO AR DE COMBUSTÃO



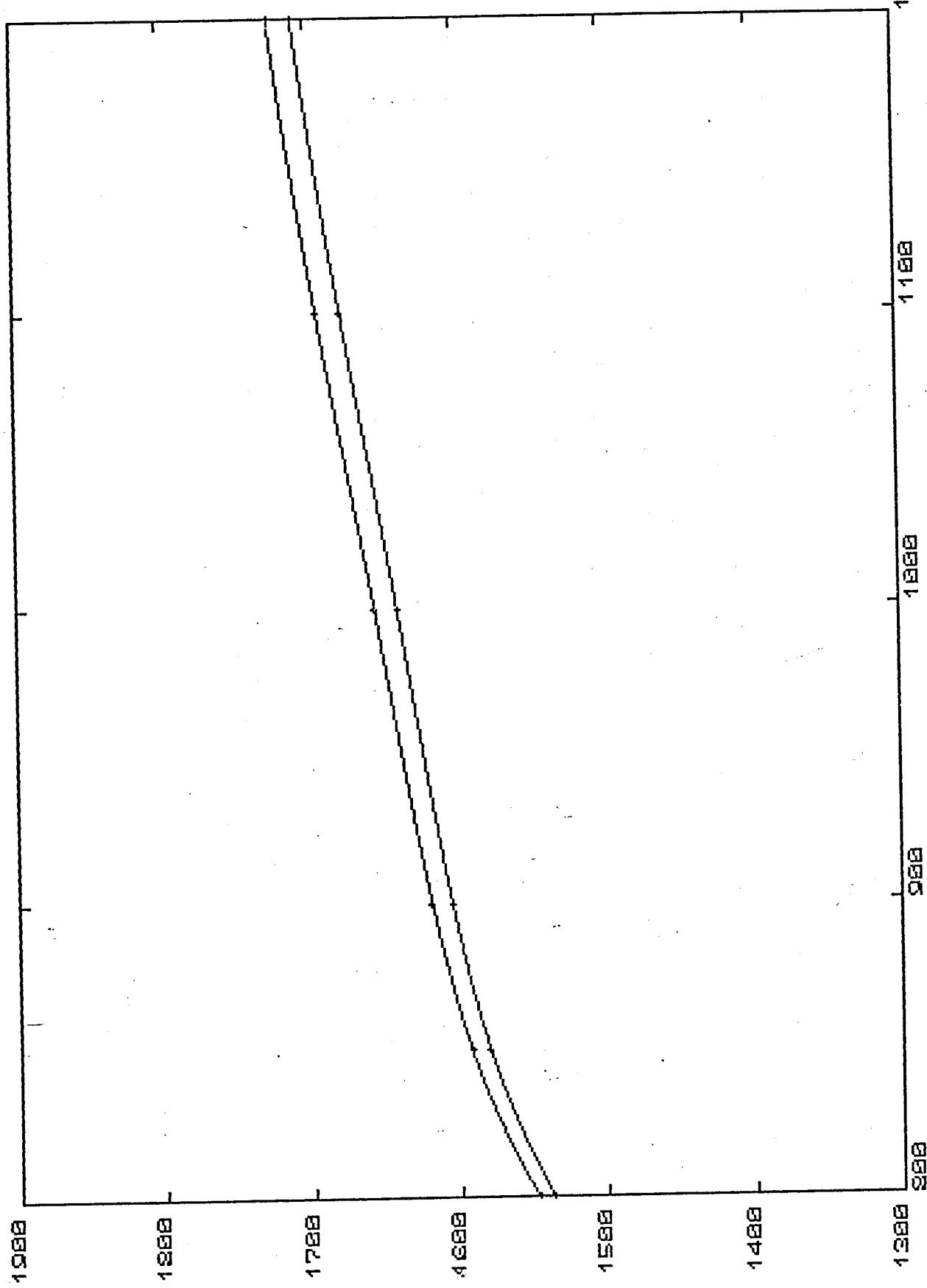


FIG. 4 TEMPERATURAS MÁXIMAS X TEMPERATURA DA PAREDE

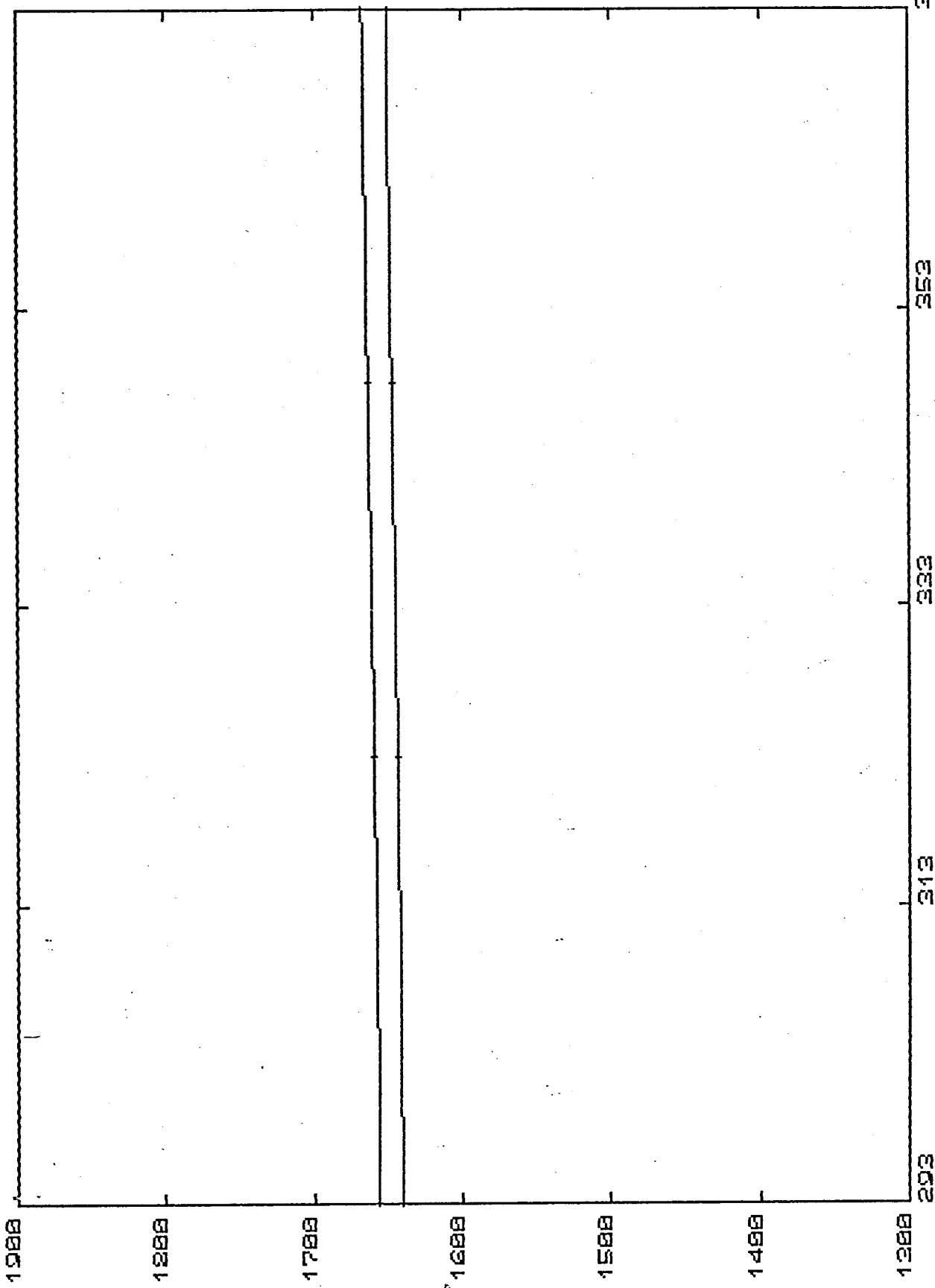


FIG. 5 TEMPERATURAS MÁXIMAS DA TEMPERATURA DA PARTÍCULA

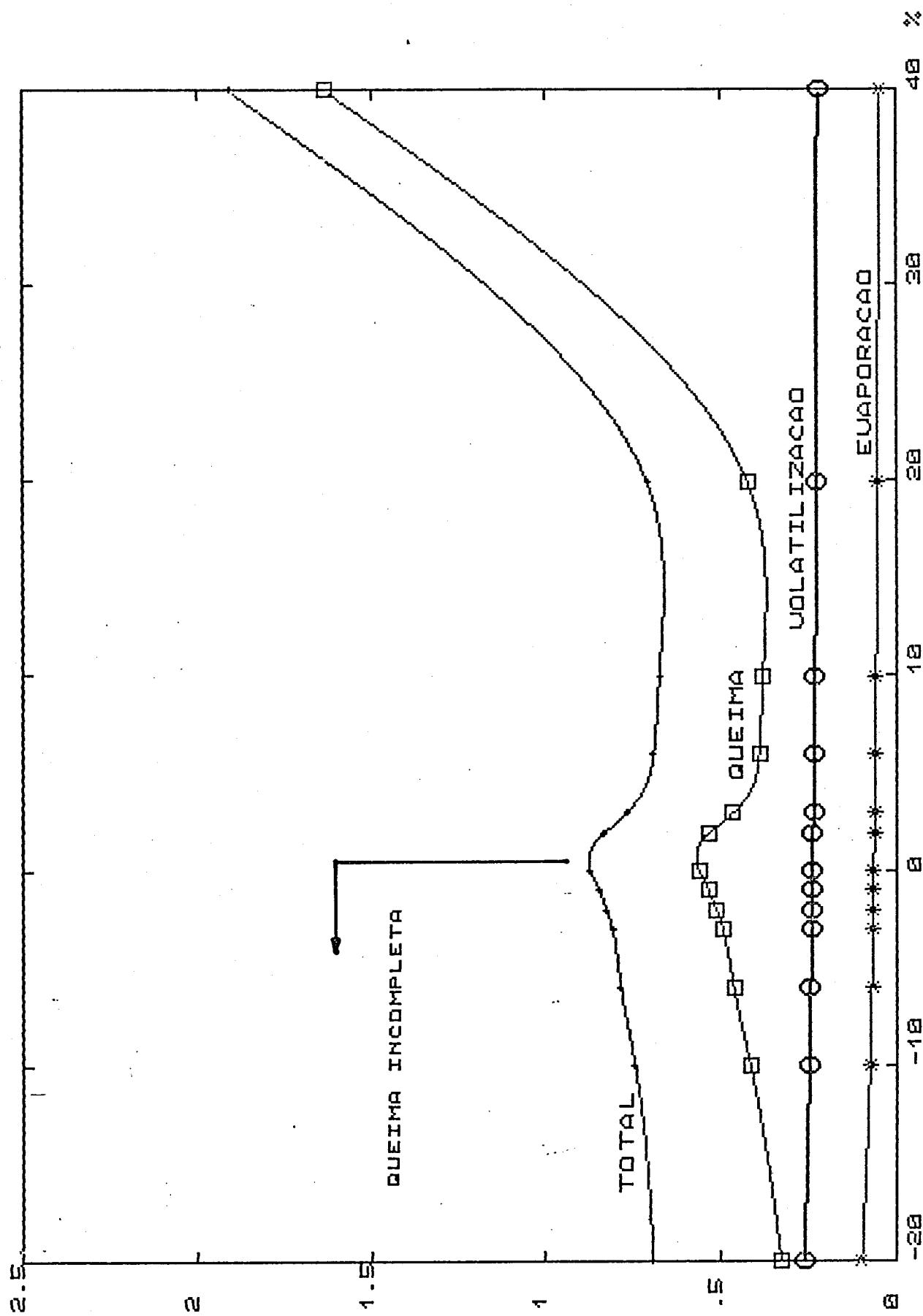


FIG. 6 - TEMPO X EXCESSO DE AR

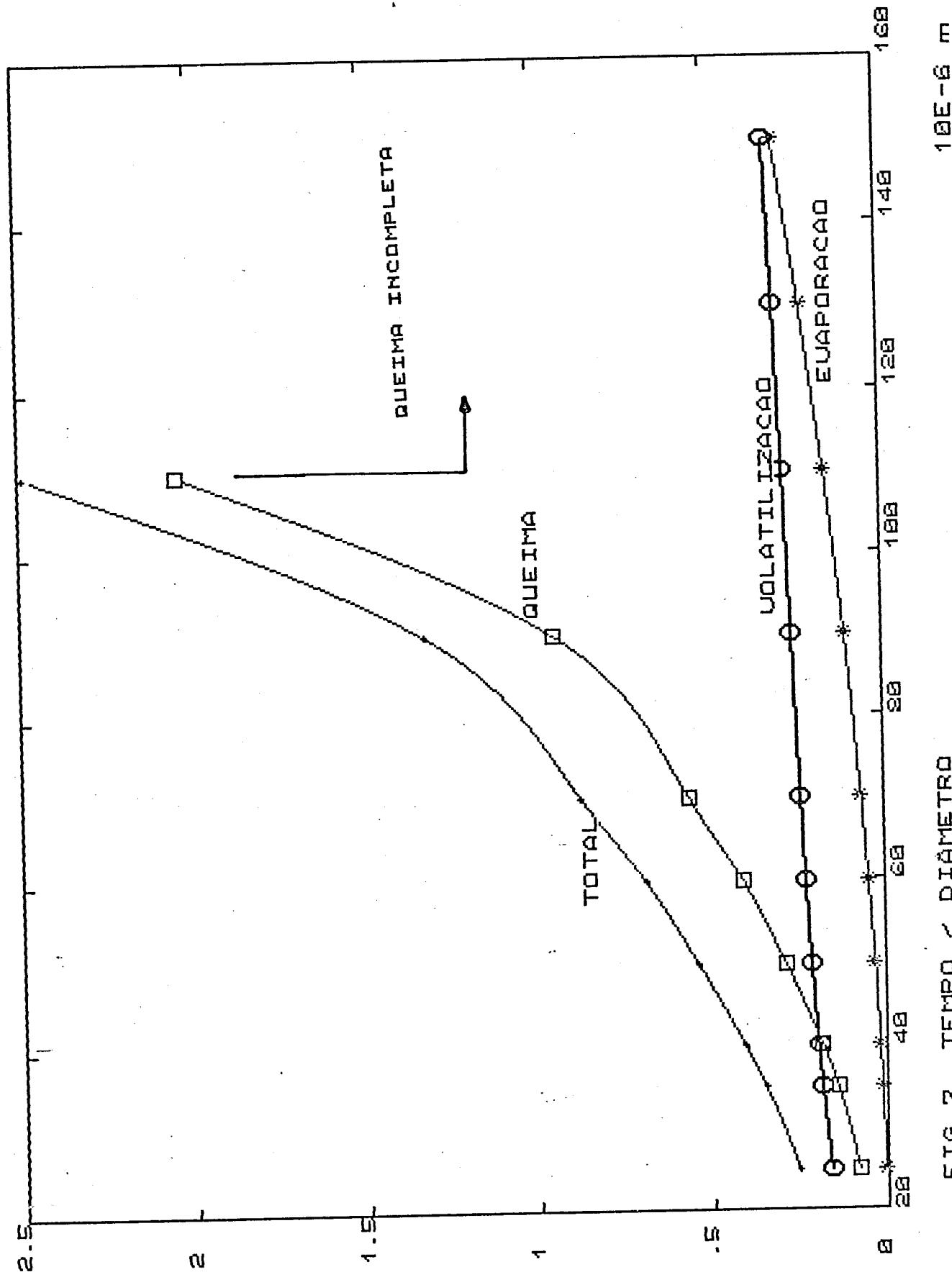
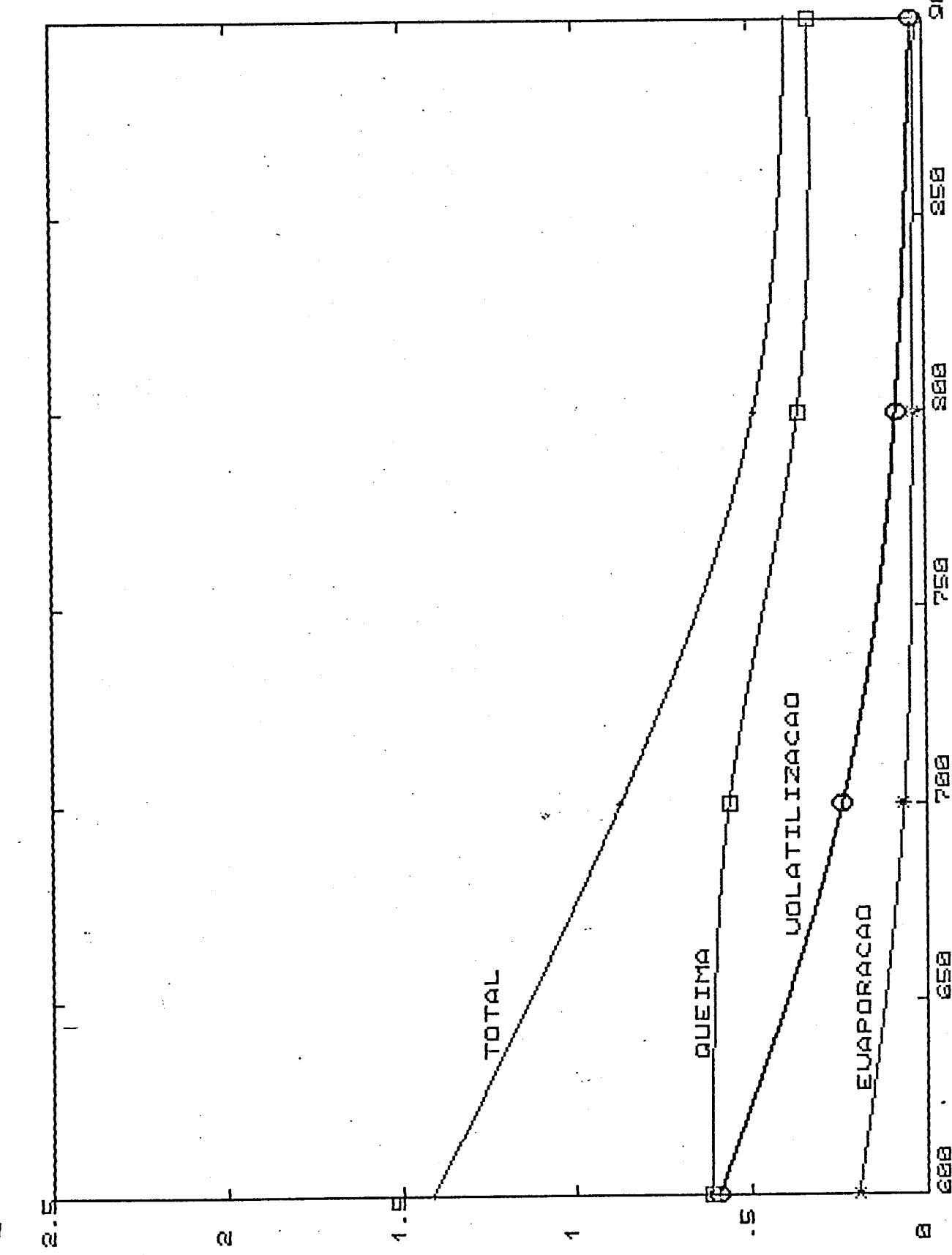


FIG. 7 TEMPO / DIÂMETRO

FIG. 8 - TEMPO X TEMPERATURA DO AR



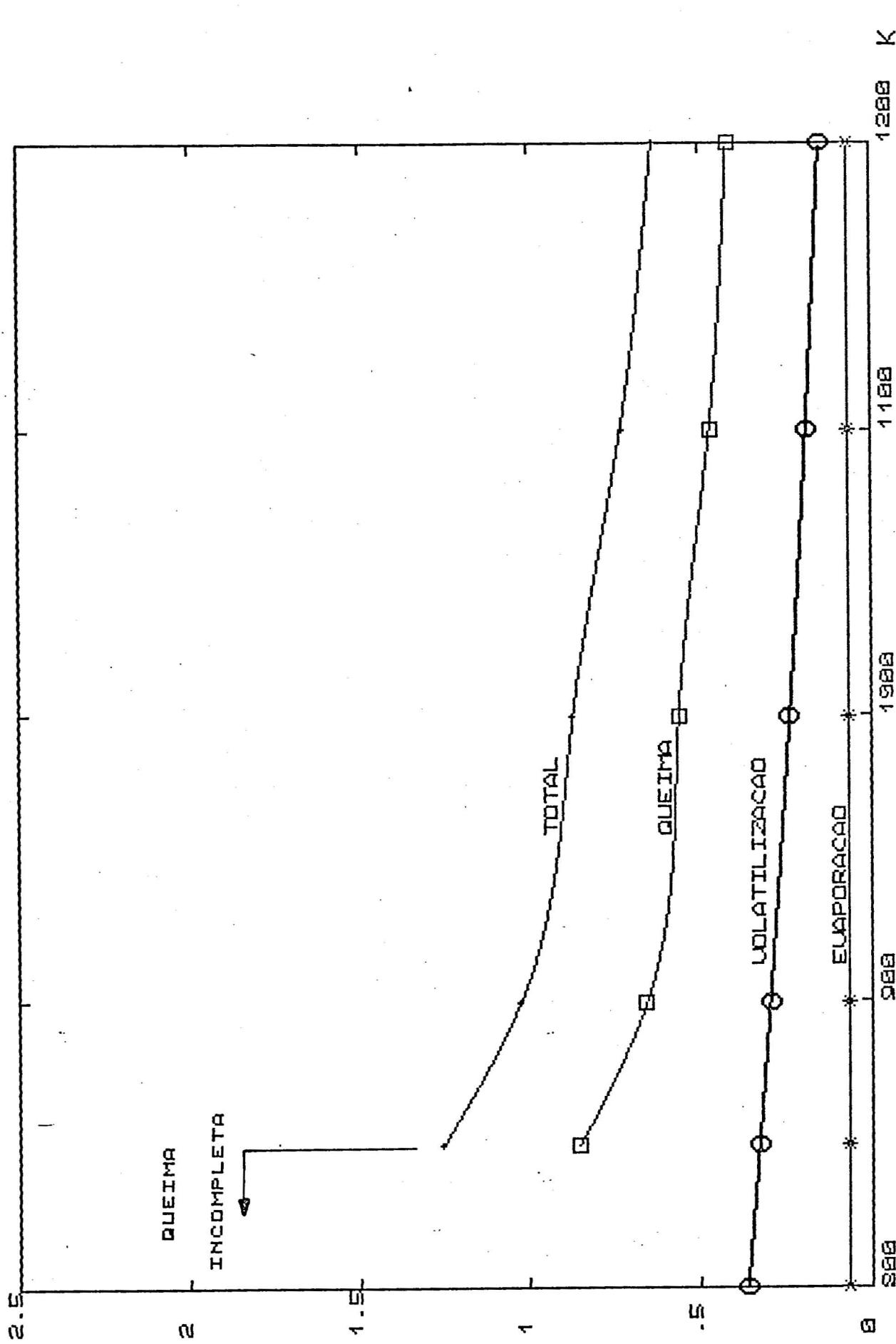


FIG. 9 TEMPO / TEMPERATURA DA PAREDE

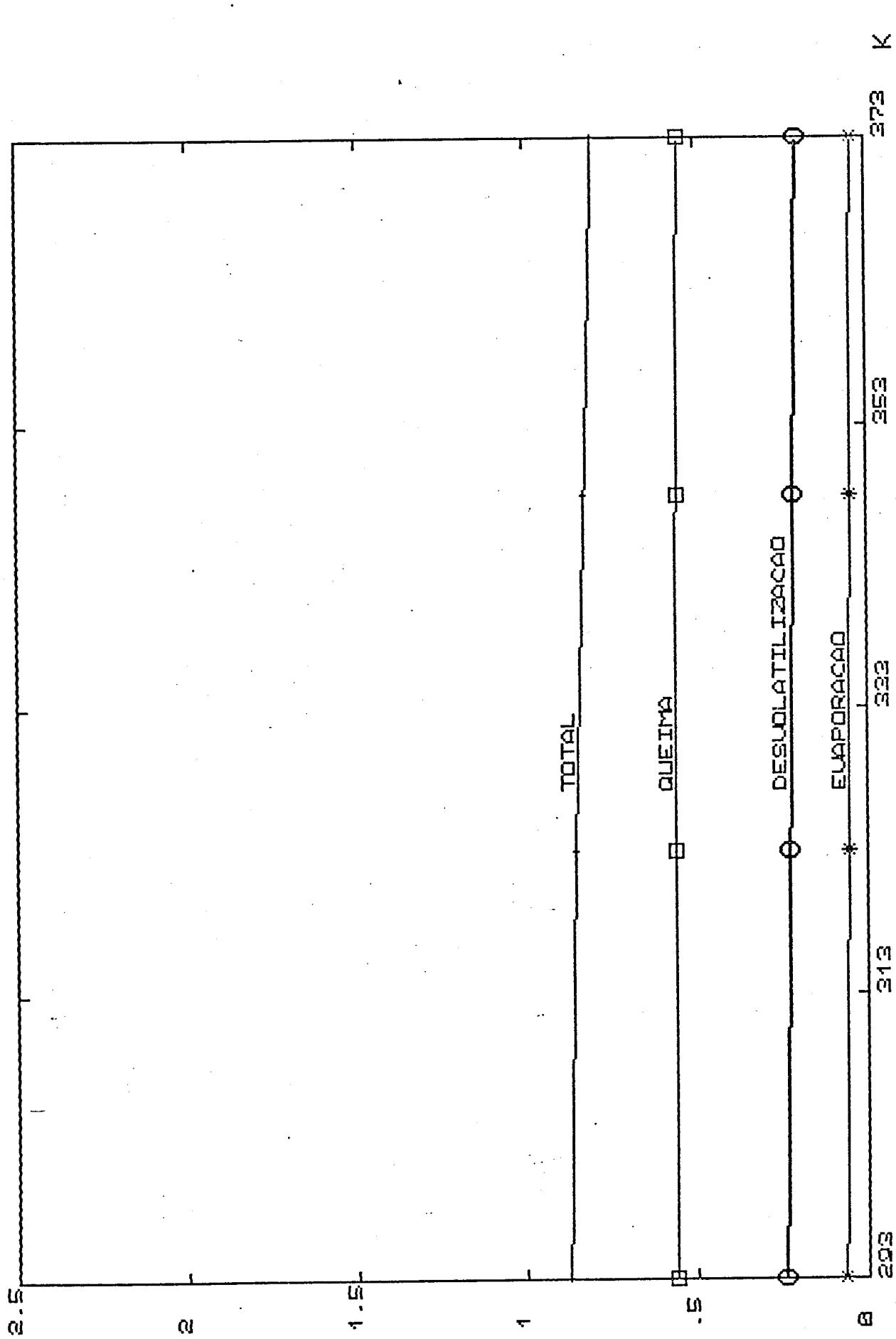


FIG. 18 TEMPO / TEMPERATURA DA PARTICULA

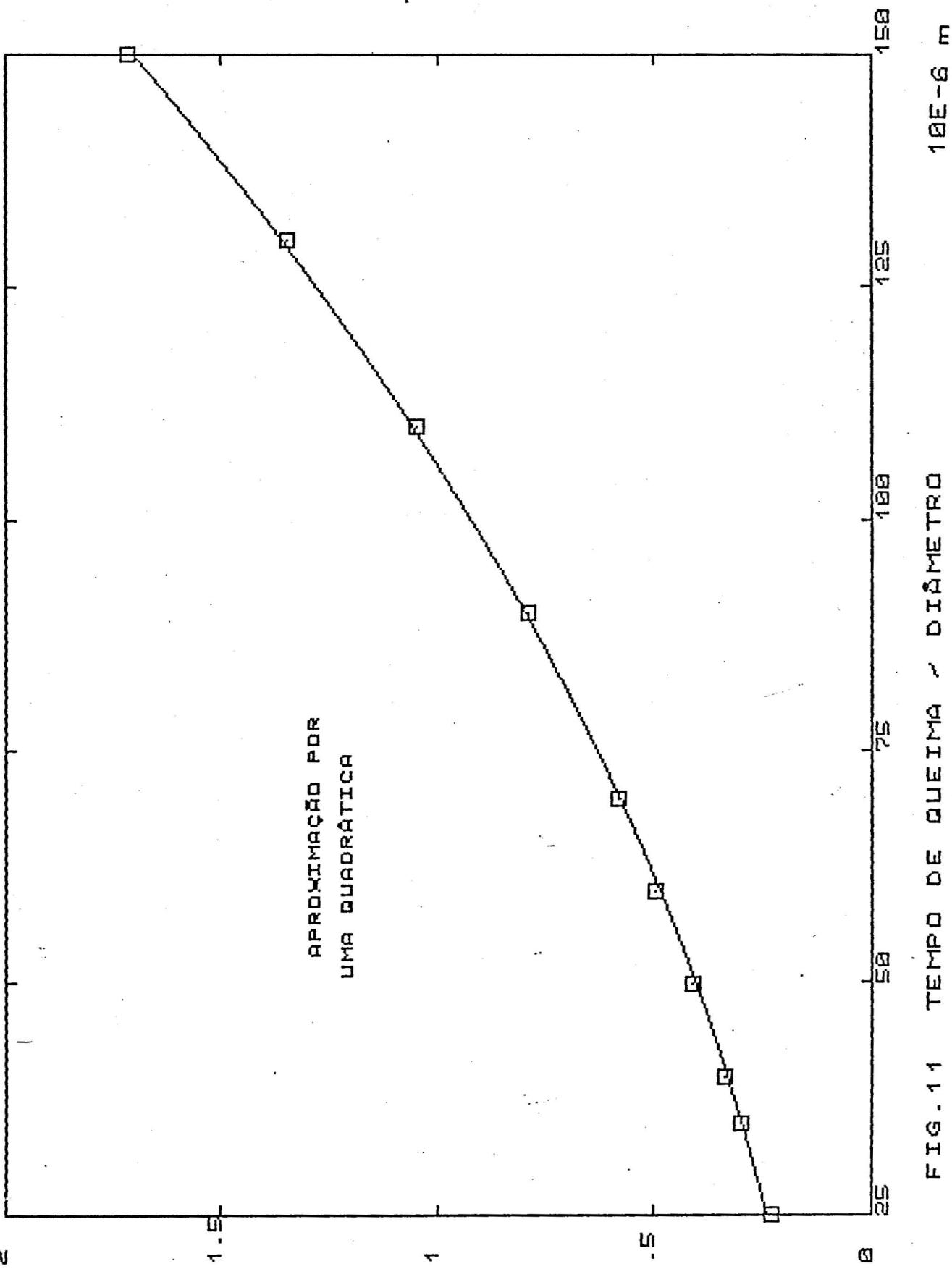


FIG. 11 TEMPO DE QUEIMA X DIÂMETRO

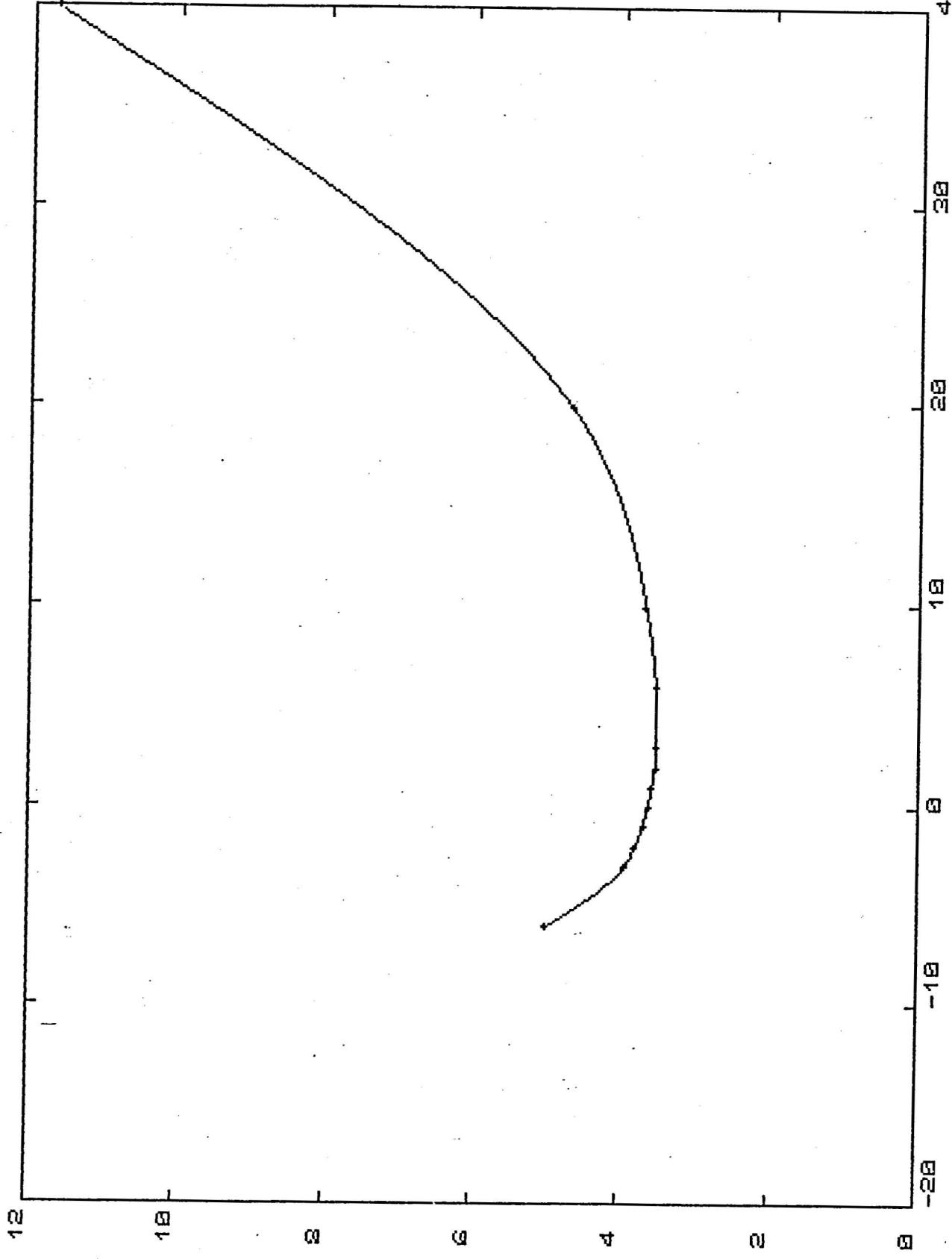


FIG. 12 DISTÂNCIA DE QUEIMA X EXCESSO DE AR

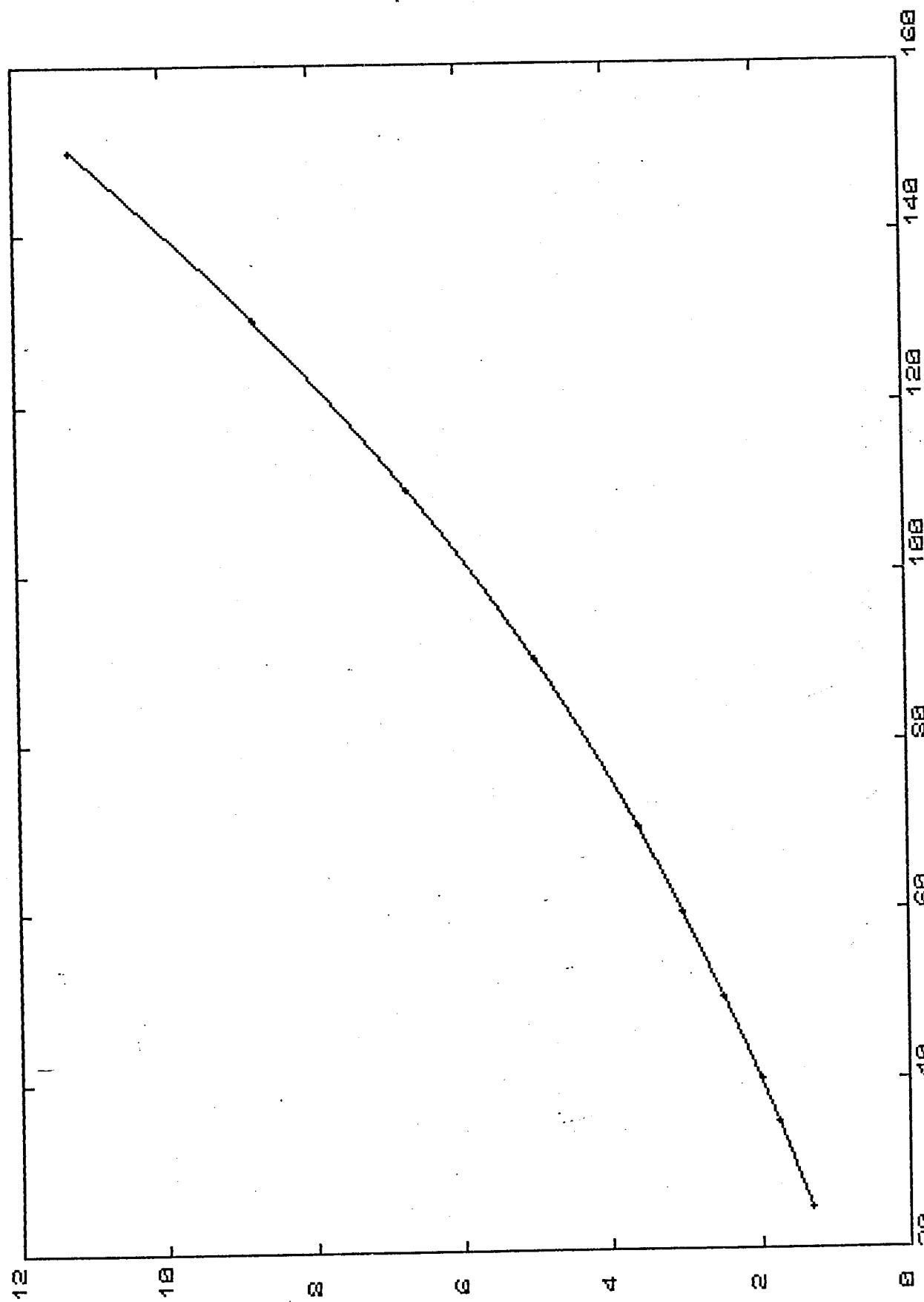


FIG. 13 DISTÂNCIA DE QUEbra X DIÂMETRO

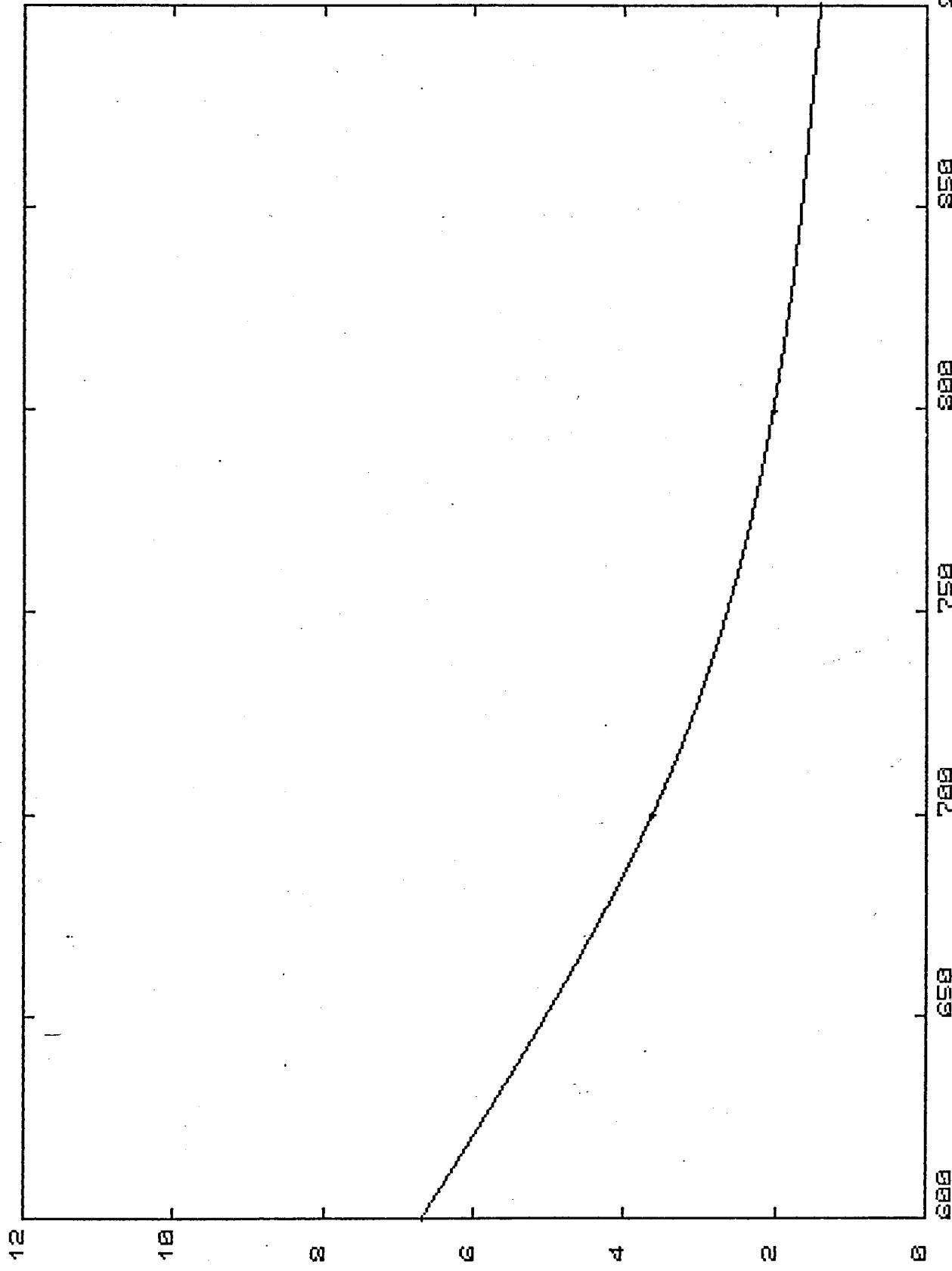
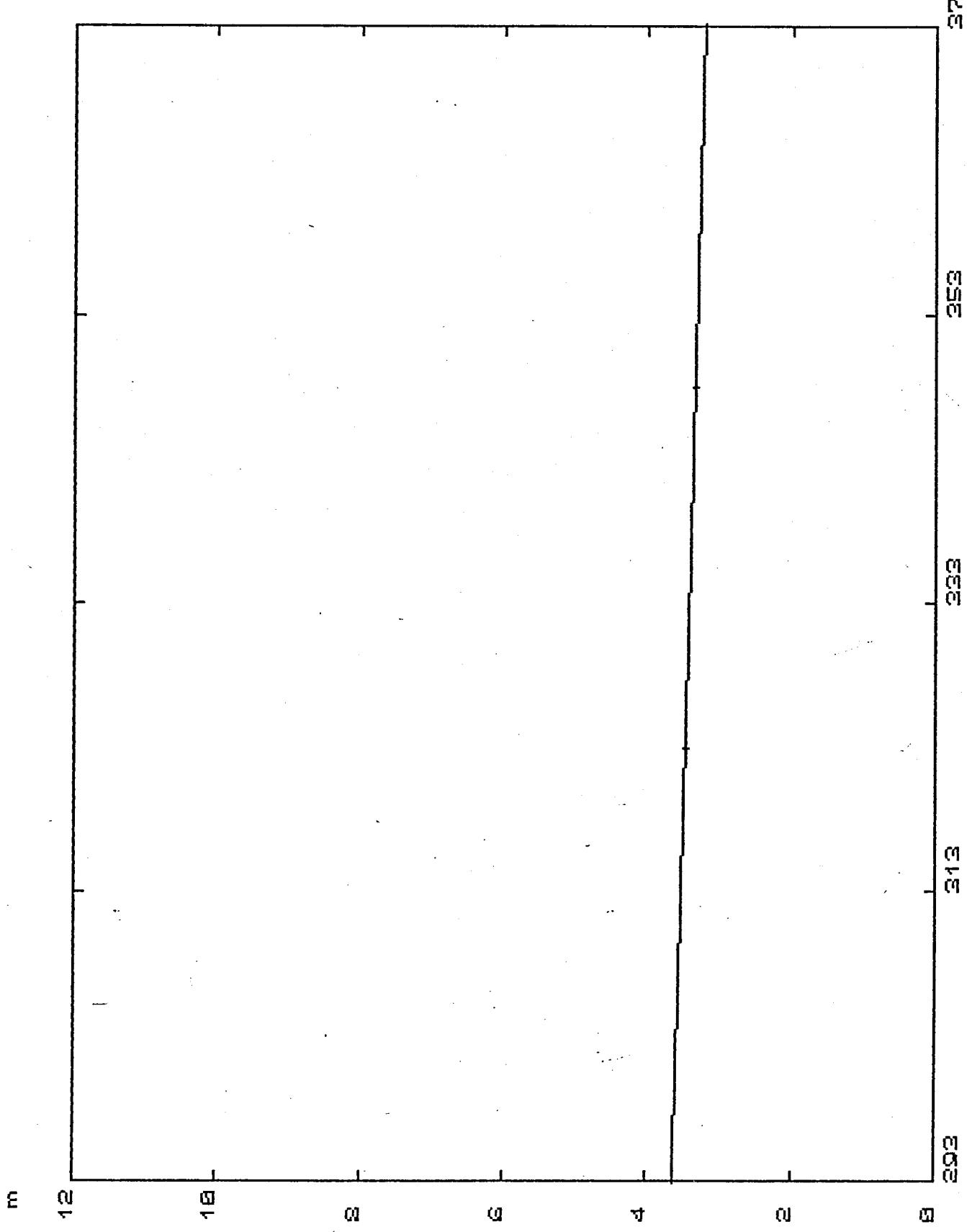


FIG. 14 DISTÂNCIA DE QUEIMA / TEMPERATURA DO AR

FIG. 15 DISTÂNCIA DE QUEIMA / TEMPERATURA DA PARTÍCULA



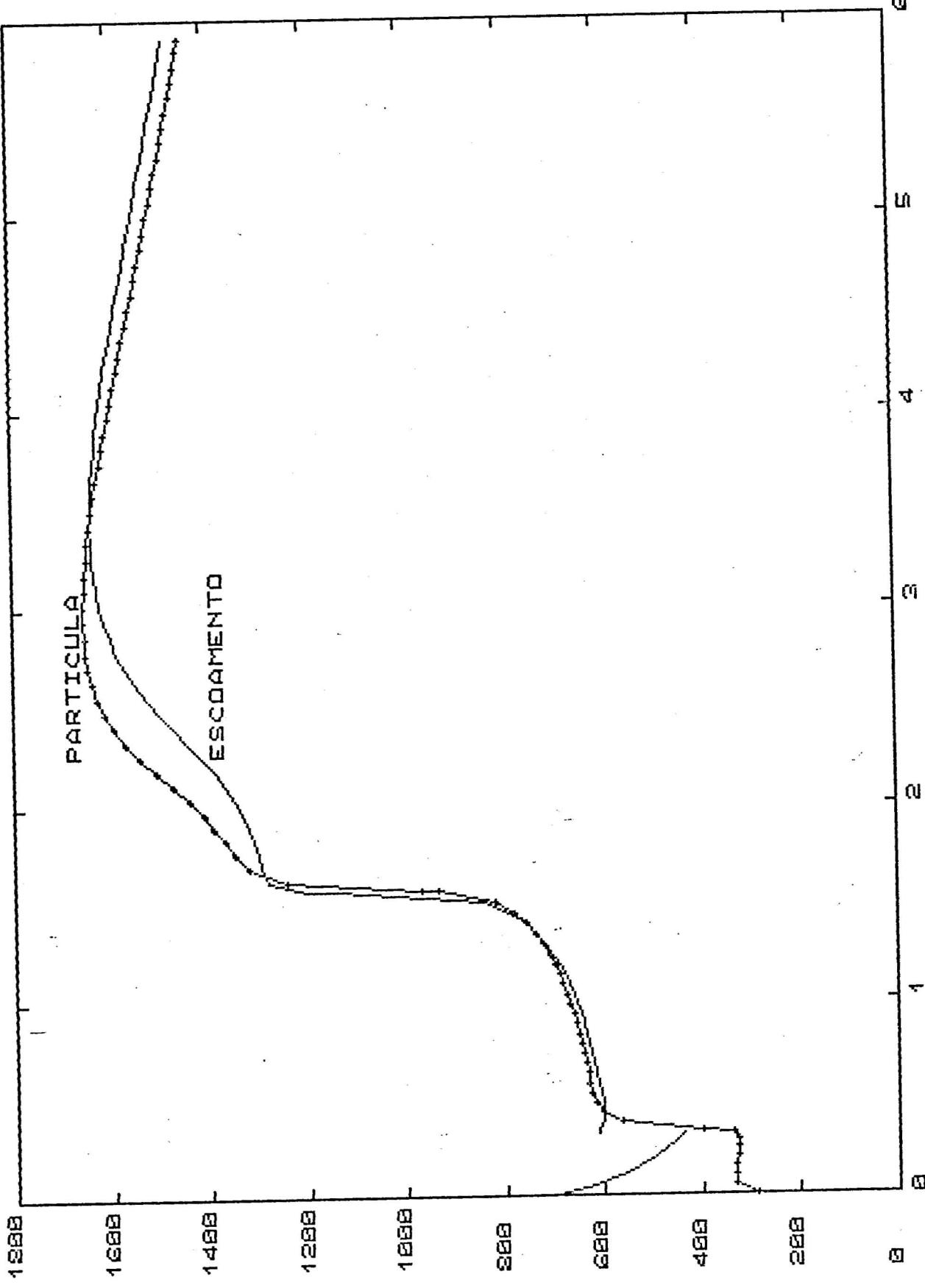
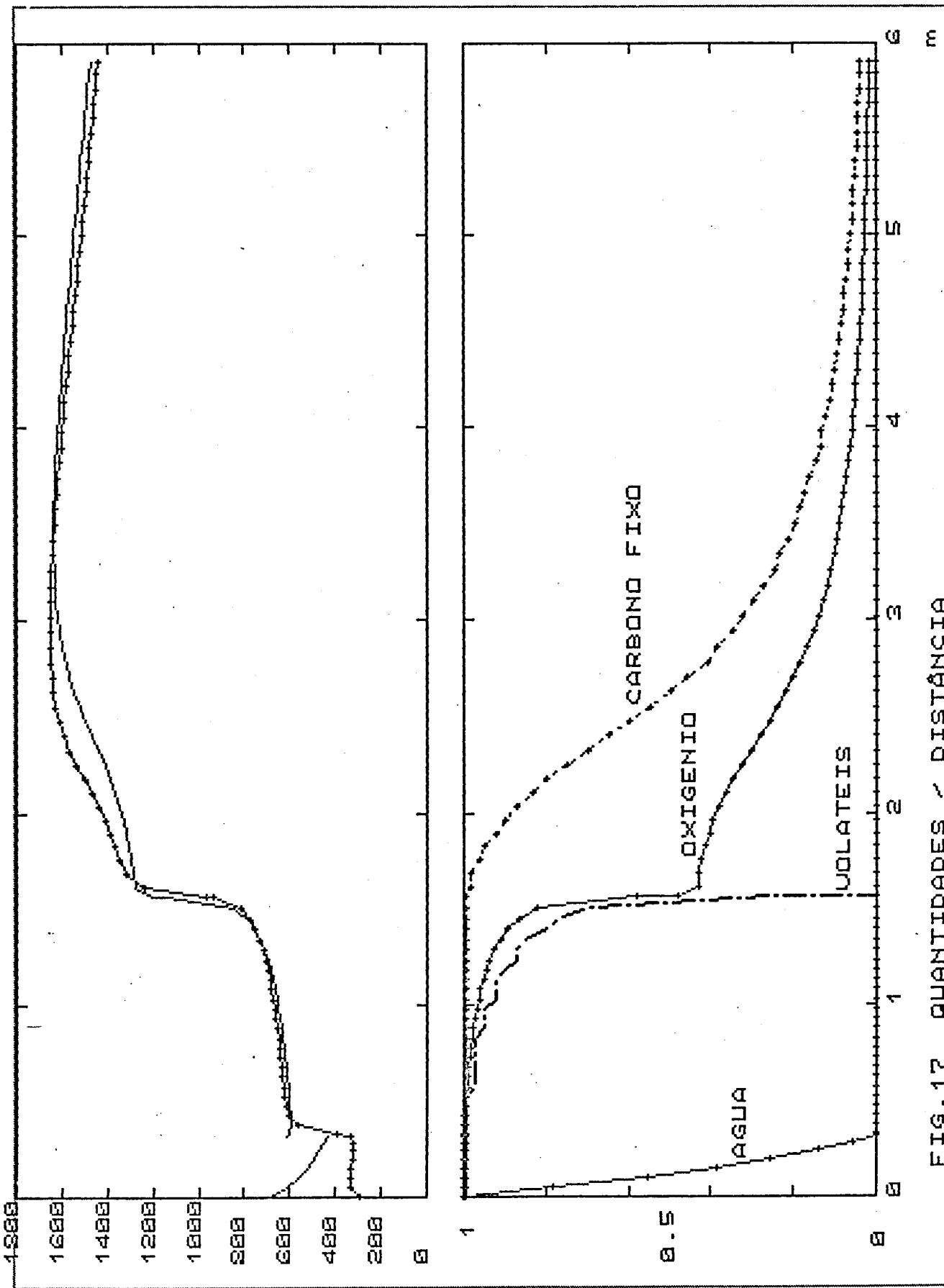


FIG. 16 TEMPERATURA / COMPRIMENTO



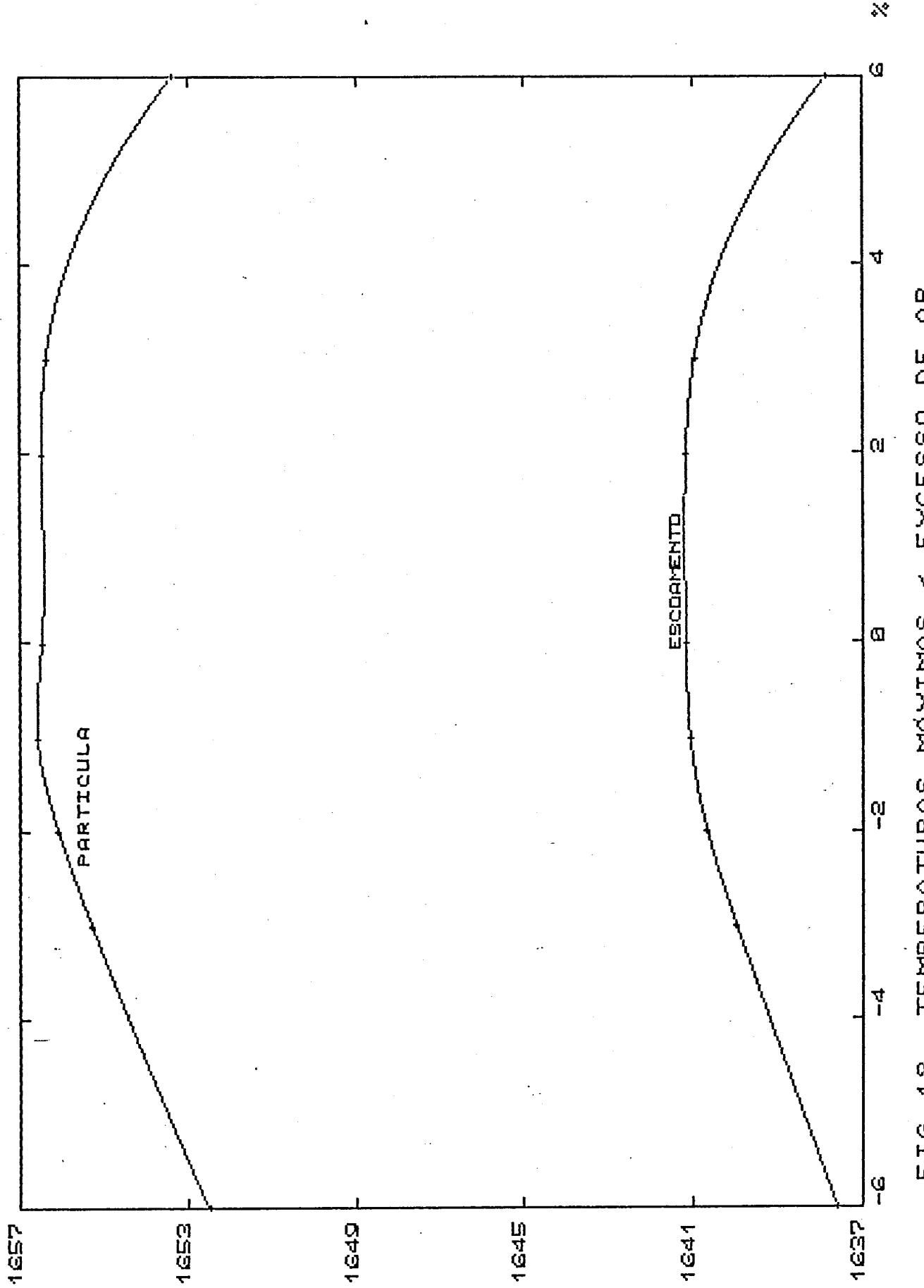


FIG. 12 TEMPERATURAS MÁXIMAS / EXCESSO DE AR

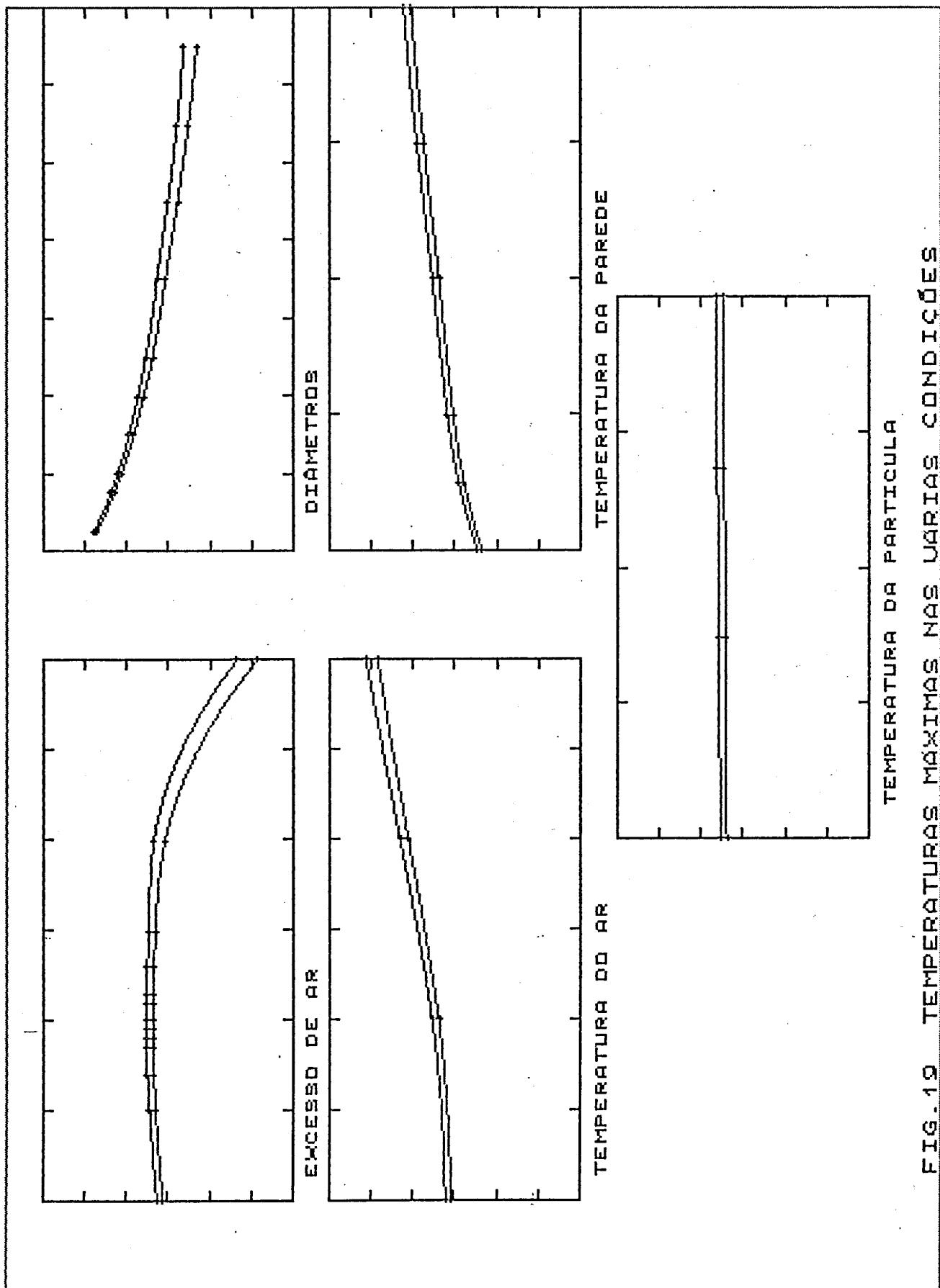


FIG. 19 TEMPERATURAS MÁXIMAS NAS VARIAS CONDIÇÕES

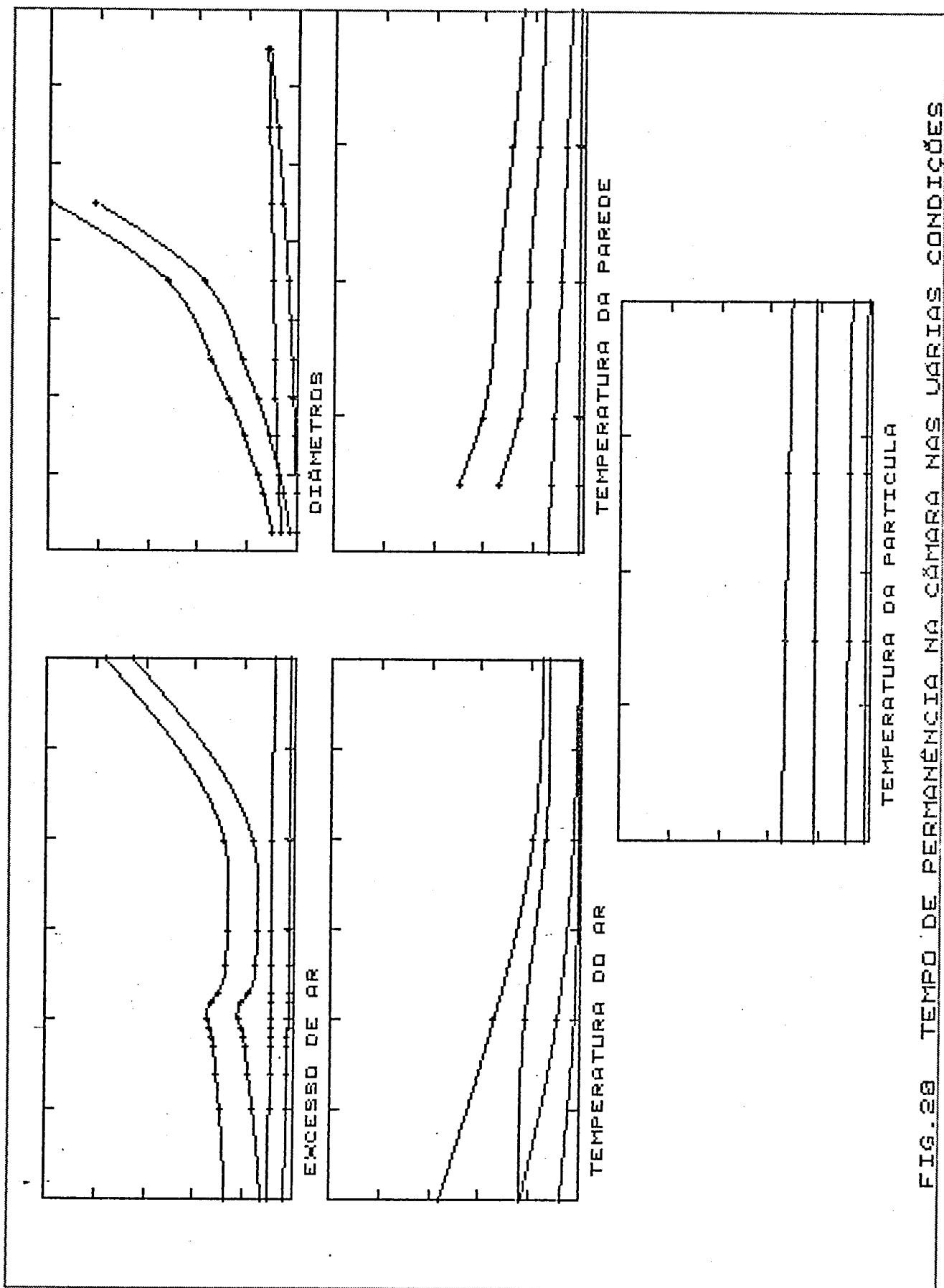
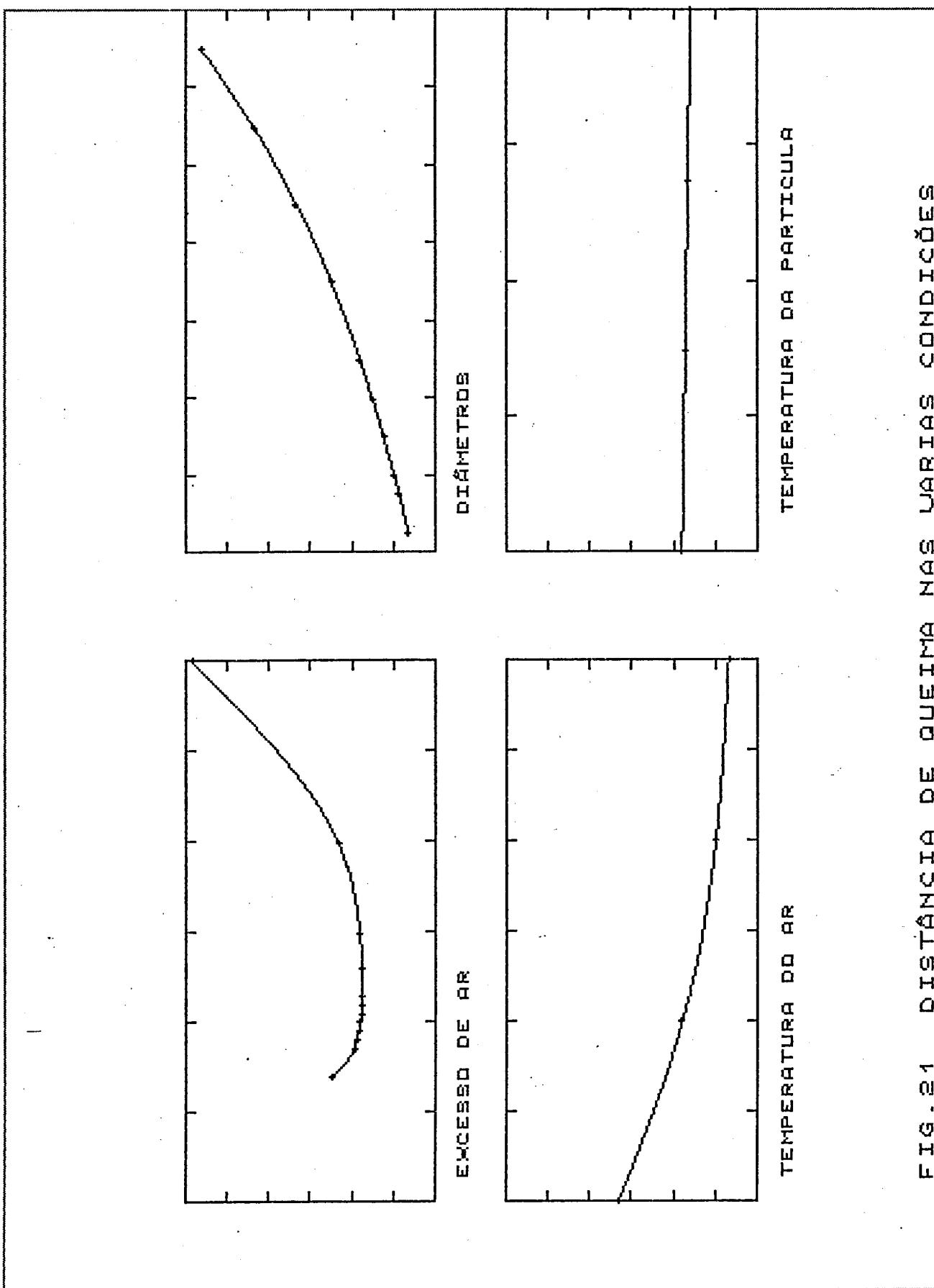
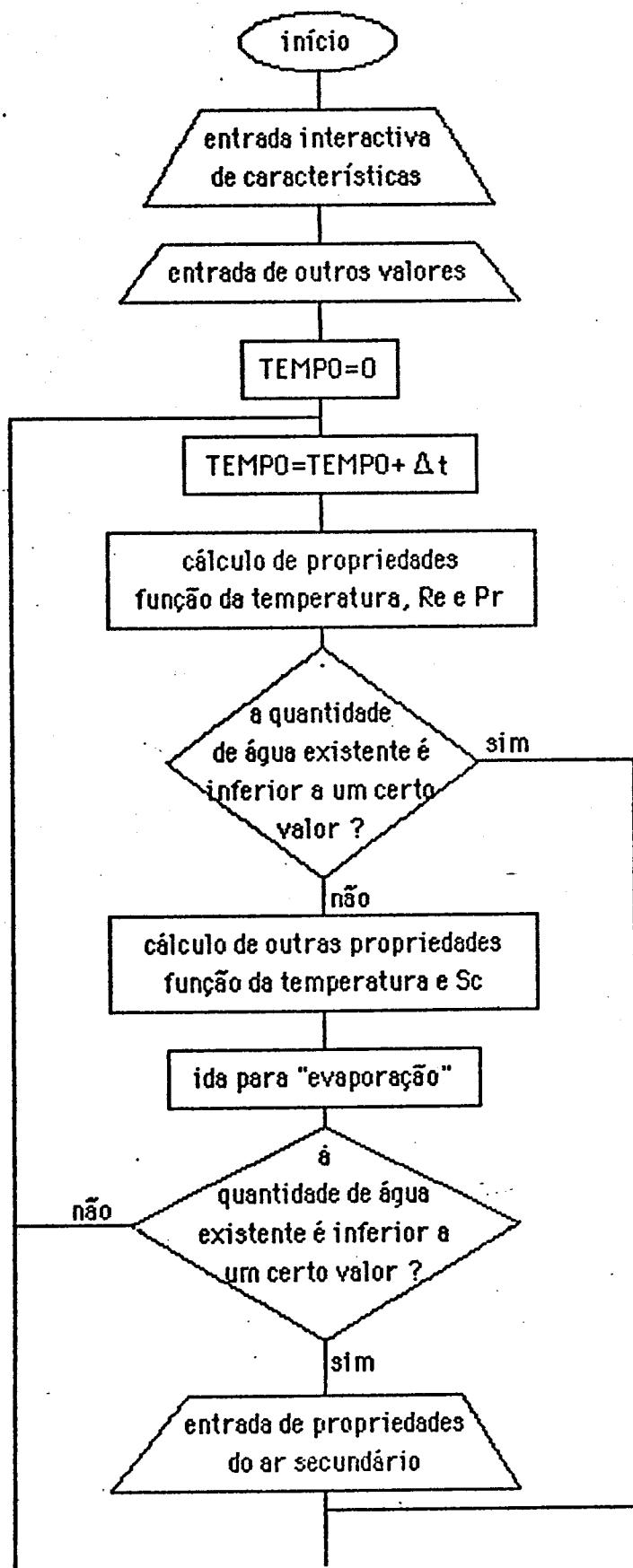
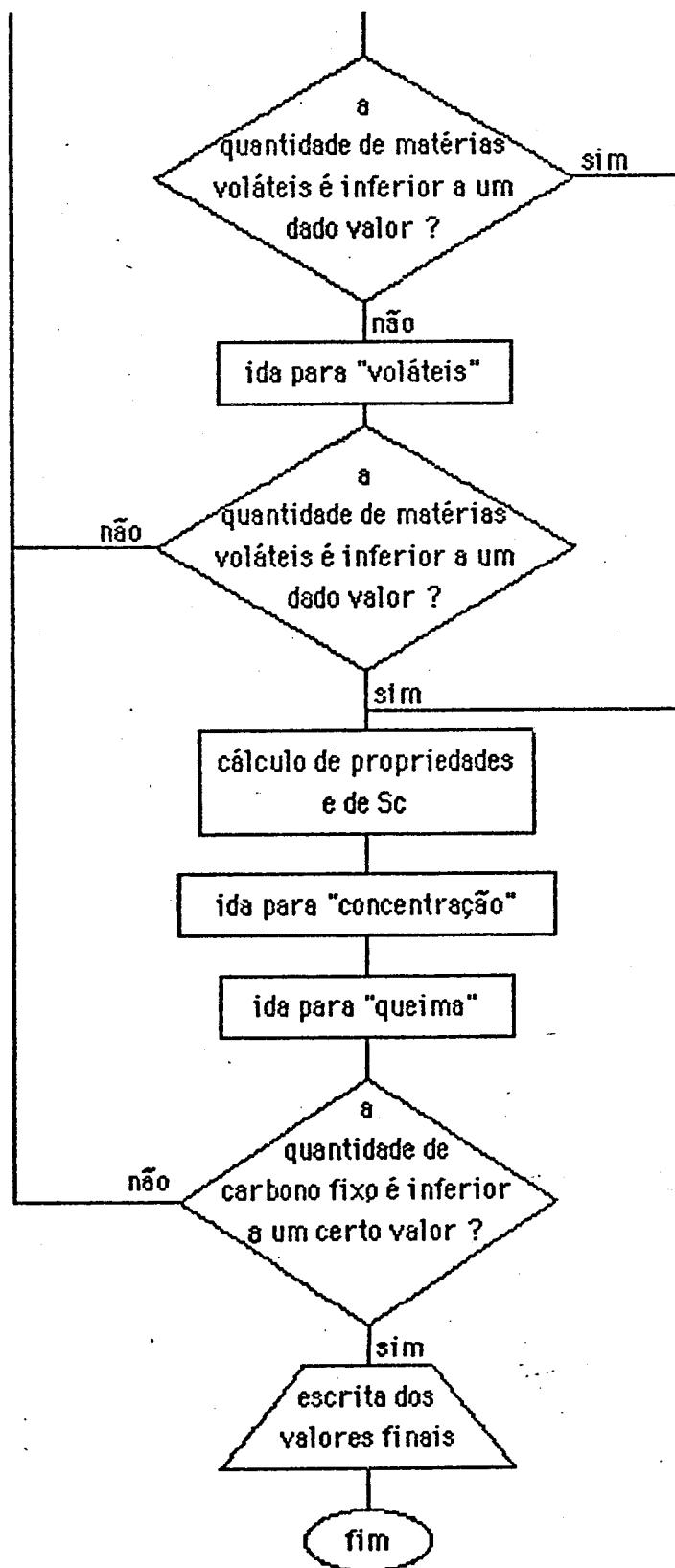


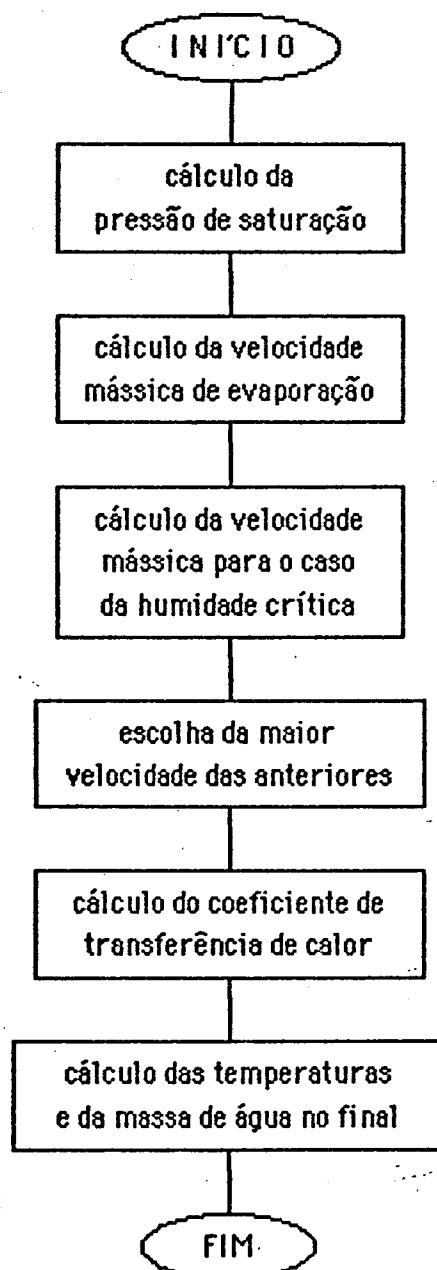
FIG. 28 TEMPO DE PERMANÊNCIA NA CÂMARA NAS VARIAS CONDIÇÕES

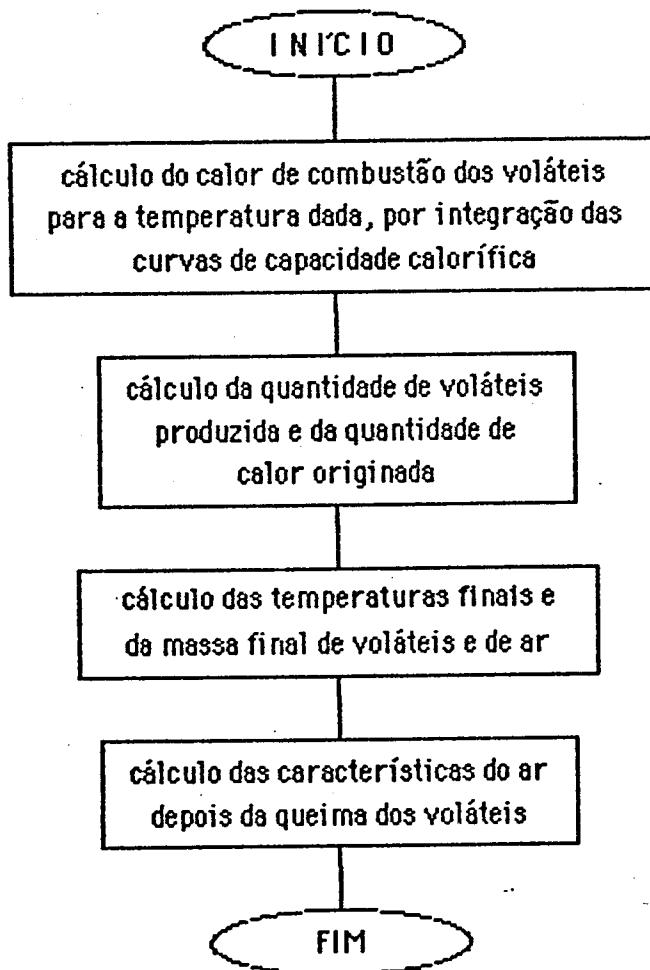


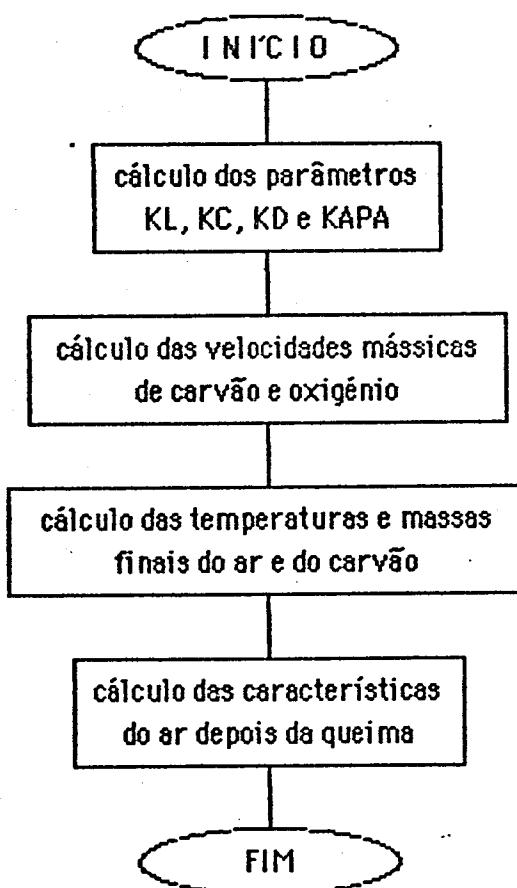
A N E X O 1 -- Diagramas de Sequência

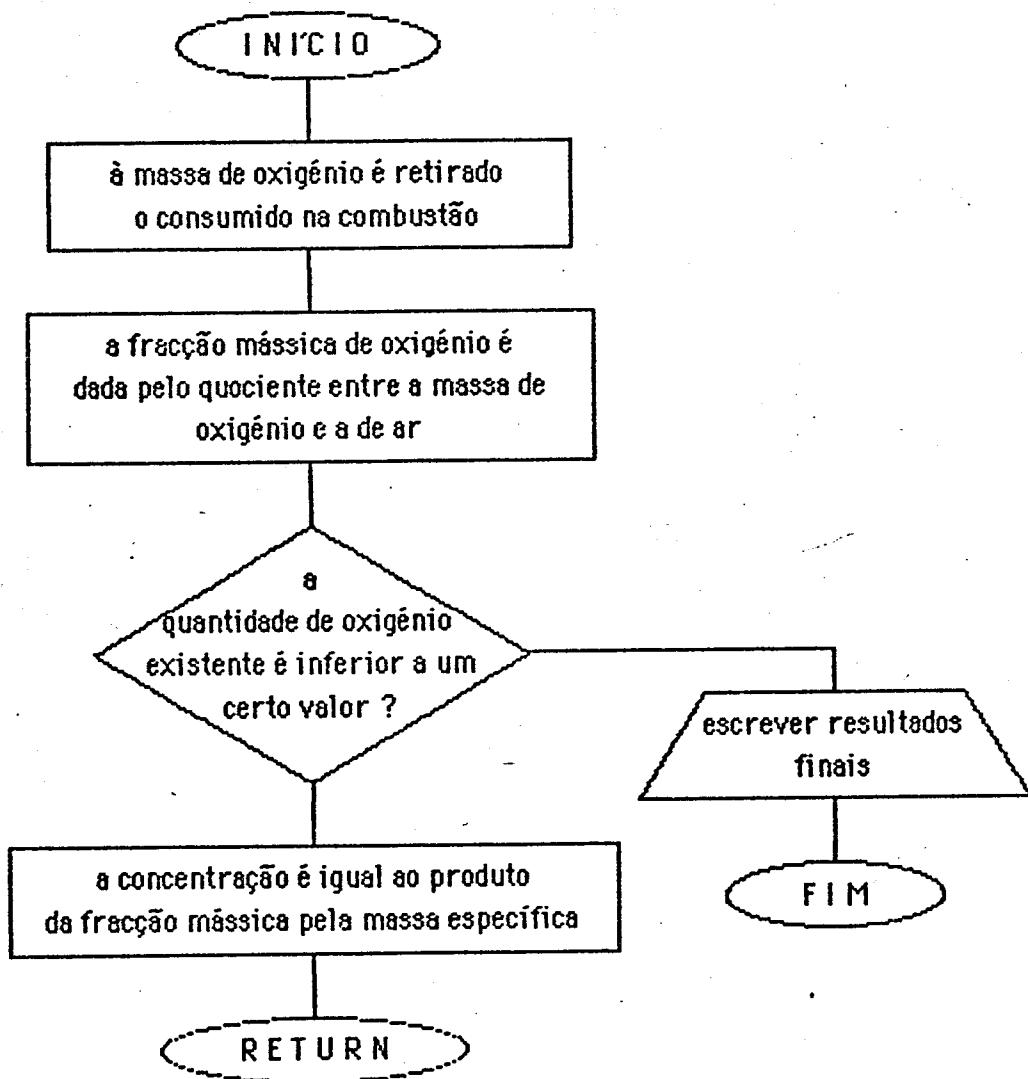
DIAGRAMA DE SEQUENCIA



SUBROTINA EVAPORAÇÃO

SUBROTINA VOLÁTEIS

SUBROTINA QUEIMA

SUBROTINA CONCENTRAÇÃO

A N E X O 2 -- Listagem do Programa

PROGRAM SLURRY

CHARACTERISTICS

```

REAL #8 TEMPO,RTTEMPO,TIT,TO,TINF,TTNT,TP,MC,MCINT,MA,MAINT,MVAPO
REAL #8 MVAUTINF,O,VAP,RO,CA,CC,CVAP,GAMAVAP,DO,A,ST,B,C,K,KL,KAPA
REAL #8 T,HT,ROAR,ROA,ROCA,RE,PR,NU,SC,E,R,I,AMRDAR,NTIWAR,CAR,VEL
REAL #8 PSAT,P,GL,HV,HLV,E1,E2,B1,B2,ALFA1,ALFA2,K1,K2,HVOL,TH,VE
REAL #8 GE,TH,RT,DO,GOX,GF,R,MCO,PC,HC,CO,IV,PT,R,PMV,FPSON,F,G
REAL #8 SIGMA,MCI,MOX,MMVINI,MMV,MAZOTO,MV,II,VP,VEL,L,HVAP
REAL #8 ROARI,CCI,MAR,MO,MARP,MOP,UFP,MOO,GFF,TCO2
REAL #8 RDA,ROVOL,ROC,RCI,RIAM,PA,PVOL,PCA,PCT,POX,MT,V,MON
REAL #8 RTA,POXP,TINFS,TCH4,TH2,HCH4,HH2,PCH4,PH2,MOINT
REAL #8 T1,T,HT,C1,C2,C3,POSS,POSE,RENII,CARCI,NTIWARCL,ROARCL
REAL #8 POSI,RENII,RENIDIM

```

SIGNIFICADO DAS VARIÁVEIS

A	- AREA SUPERFICIAL DO SLURRY	cm^2
ALFA1	- COEF. ESTEQ. DE MASSA (baixa Temp.)	-
ALFA2	- COEF. ESTEQ. DE MASSA (alta Temp.)	-
B	- FACTOR DE FREQUENCIA	$\text{cm/s}, \text{KJ}$
B1	- PSEUDO FACTOR DE FREQUENCIA (baixa Temp.) ($1/\text{s}$)	-
B2	- PSEUDO FACTOR DE FREQUENCIA (alta Temp.) ($1/\text{s}$)	-
C	- CONCENTRACAO DE OXIGENIO NO TINFINITO	kg/m^3
CA	- CAPACITADE CALORIFICA DA AGUA	$\text{EJ/kg}, \text{KJ}$
CAR	- CAPACITADE CALORIFICA DO AR	$\text{EJ/kg}, \text{KJ}$
CARCL	- CAPACITADE CAL. DO AR (camada limite)	$\text{EJ/kg}, \text{KJ}$
CC	- CAPACITADE CALORIFICA DO CARVAO	$\text{EJ/kg}, \text{KJ}$
CCI	- CAPACITADE CALORIFICA DA CINZA	$\text{EJ/kg}, \text{KJ}$
CO	- CONSUMO DE OXIGENIO	EkgJ
CP02	- CAPACITADE CALORIFICA DO OXIGENIO	$\text{EJ/kg}, \text{KJ}$
CPC02	- CAPACITADE CALORIFICA DO CO2	$\text{EJ/kg}, \text{KJ}$
CPCH4	- CAPACITADE CALORIFICA DO CH4	$\text{EJ/kg}, \text{KJ}$
CPH2	- CAPACITADE CALORIFICA DO HIDROGENIO	$\text{EJ/kg}, \text{KJ}$
CPH20	- CAPACITADE CALORIFICA DO H2O	$\text{EJ/kg}, \text{KJ}$
CVAP	- CAPACITADE CALORIFICA DO VAPOR	$\text{EJ/kg}, \text{KJ}$
C1	- CAPACITADE CALORIFICA DO AR	$\text{EJ/kg}, \text{KJ}$
C2	- CAPACITADE CALORIFICA DO AR	$\text{EJ/kg}, \text{KJ}$
C3	- CAPACITADE CALORIFICA DO AR	$\text{EJ/kg}, \text{KJ}$
D	- COEFICIENTE DE DIFUSAO (vapor no ar)	cm^2/s
DI	- COEF. DE DIFUSAO DE O2 (poro ou cinza)	cm^2/s
DTAM	- DIAMETRO DO SLURRY	cm
DO	- COEF. DE DIFUSAO DE O2	cm^2/s
DT	- INCREMENTO DE TEMPERATURA	KJ
DTEMPO	- INCREMENTO DE TEMPO	EsJ
DW	- MASSA VOLATEIS VOLATILIZADOS	EkgJ
E	- ENERGIA DE ACTIVACAO	$\text{EJ/kmol}\text{eJ}$
EC	- ESPESSURA DE CINZA	cm
E1	- PSEUDO ENERGIA DE ACTIVACAO (baixa T)	$\text{EJ/kmol}\text{eJ}$
E2	- PSEUDO ENERGIA DE ACTIVACAO (alta T)	$\text{EJ/kmol}\text{eJ}$
EPSILON	- EMISSIVIDADE DO CARVAO	-
F	- FACTOR DE FORMA PARA RADIACAO	-
G	- FLUXO MASSICO DE VAPOR	$\text{Ekg/m}^2, \text{sJ}$
GAMAVAP	- QUOCIENTE (LVAP/CVAP)	$\text{Ekg/m}^2, \text{sJ}$
GF	- FLUXO MASSICO DE CARVAO	$\text{Ekg/m}^2, \text{sJ}$
GI	- FLUXO MASSICO DE VAPOR PARA RE=0	$\text{Ekg/m}^2, \text{sJ}$
GOX	- FLUXO MASSICO DE O2	$\text{Ekg/m}^2, \text{sJ}$
H	- COEFICIENTE DE CONVECCAO	$\text{Ew/m}^2, \text{KJ}$

HC	- CALOR DE COMBUSTAO DO CARVAO	[J/kg]
HCH4	- CALOR DE COMBUSTAO DO metano	[J/kg]
HD	- COEFICIENTE TRANSFERENCIA DE MASSA	[kg/m.s]
HH2	- CALOR DE COMBUSTAO DO hidrogenio	[J/kg]
HL	- ENTALPIA DO LÍQUIDO	[J/kg]
HIV	- COEF. TRANSF. DE CALOR PARA RE=0	[W/m2.K]
HT	- ENTALPIA DO AR (=CP*H)	[J/kg]
HV	- COEFFICIENTE DE TRANSP. DE CALOR (VAP.)	[W/m2.K]
HVAP	- ENTALPIA DO VAPOR	[J/kg]
HVOL	- CALOR DE COMBUSTAO DOS VOLATEIS	[J/kg]
I	- COEFFICIENTE ESTEQUIOMETRICO (ar-carvao)	-
ICH4	- COFF. ESTEQUIOMETRICO (ar-metano)	-
ICO2	- COEF. ESTEQUIOMETRICO (ar+carvao=CO2)	-
IR	- COEFFICIENTE ESTEQUIOMETRICO (ar+hidrogenio)	-
IV	- COEFFICIENTE ESTEQUIOMETRICO (ar+volateis)	-
K	- CONSTANTE DE REACAO QUIMICA	[m/s]
KC	- "RESISTENCIA" A QUEIMA (da cinza)	[m/s]
KD	- "RESISTENCIA" A DIFIMA (da difusao de O2)	[m/s]
K1	- CONST. DE DESVOLATILIZACAO (baixa Temp.)	[1/s]
K2	- CONST. DE DESVOLATILIZACAO (alta Temp.)	[1/s]
KL	- CONSTANTE DE REACAO QUIMICA MODIFICADA	[m/s]
KAPA	- CONST. DE REACAO QUIM. REFERIDA AO TNF	[m/s]
L	- CALOR LATENTE DE VAPORIZACAO (AGUA)	[J/kg]
LAMBDAR	- CONDUTIBILIDADE TERMICA DO AR	[W/m.K]
LVAP	- CONDUTIBILIDADE TERMICA DO VAPOR	[W/m.K]
MA	- MASSA DE AGUA	[kg]
MAINI	- MASSA DE AGUA INICIAL	[kg]
MAR	- MASSA DE AR	[kg]
MARP	- MASSA DE AR PRIMARIO	[kg]
MAZOTO	- m (fraccao massica) DE AZOTO	[kg/kg]
MC	- MASSA DE CARVAO FIXO	[kg]
MC1	- MASSA DE CINZA	[kg]
MCINI	- MASSA DE CARVAO INICIAL	[kg]
MCO	- MASSA DE CARVAO SEM HUMIDIDADE NEM CINZAS	[kg]
MCO2	- m (fraccao massica) DE CO2 A SUPERFICIE	[kg/kg]
MMV	- MASSA DE VOLATEIS	[kg]
MMVINI	- MASSA DE VOLATEIS INICIAIS	[kg]
MO	- MASSA DE OXIGENIO	[kg]
MON	- MASSA DE OXIGENIO NECESSARIO	[kg]
MOP	- MASSA DE OXIGENIO PRIMARIO	[kg]
MDO	- m (fraccao massica) DE OXIGENIO SUP.	[kg/kg]
MOX	- m (fraccao massica) DE OXIGENIO INF.	[kg/kg]
MT	- MASSA TOTAL DO SLURRY	[kg]
MV	- MASSA DE VAPOR VAPORIZADO	[kg]
MVAP0	- m (fraccao massica) DE VAPOR A SUPERF.	[kg/kg]
MVAPINF	- m (fraccao massica) DE VAPOR NO INF.	[kg/kg]
NIUAR	- VISCOSIDADE DO AR	[N.s/m2]
NIUARCI	- VISCOSIDADE DO AR (camada limite)	[N.s/m2]
NU	- NUMERO DE NUSSELT	-
P	- PRESSAO DA CAMARA	[kgf/cm2]
PA	- PERCENTAGEM DE AGUA	-
PCA	- PERCENTAGEM DE CARVAO FIXO	-
PCH4	- PERCENTAGEM DE METANO NOS VOLATEIS	-
PCT	- PERCENTAGEM DE CINZA	-
PH2	- PERCENTAGEM DE HIDROGENIO NOS VOLATEIS	-
POS	- POSTICAO	[cm]
POSF	- COMPRIMENTO DA CAMARA DE COMBUSTAO	[cm]
POST	- COMPRIMENTO DA CAMARA PARA UM REND. REND.	[cm]
POSS	- POSICIONAMENTO DA ENTRADA DO AR SECUNDARIO	[cm]
POX	- PERCENTAGEM DE O2 NA SATIA (excesso de ar)	-

PR	- NUMERO DE PRANDTL	-
PSAT	- PRESSAO DE SATURACAO DA AGUA	Eks/cm ²
PVOL	- PERCENTAGEM DE MATERIAS VOLATEIS	-
Q	- QUANTIDADE DE CALOR CONVECTIVO	EJ
QD	- QUANTIDADE DE CALOR (vaporizacao)	EW/m ² .s
QC	- CALOR FORNECIDO A PARTICULA (queima)	EJ
QE	- CALOR FORNECIDO AO AR POR COMB. DE VOLATELAS	EJ
QH	- CALOR FORNECIDO A PARTICULA POR QUEIMA	EJ
QV	- CALOR FORNECIDO A PARTICULA (volat.)	EJ
R	- CONSTANTE DOS GASES PERFEITOS	EJ/kmole.K
RO	- RAIJO DO SLURRY	Em ³
REND	- RENDIMENTO DA COMBUSTAO (para a pos. dada)	-
RENDI	- RENDIMENTO DA COMBUSTAO	-
RENDIM	- RENDIMENTO PARA O QUAL ACARA A COMBUSTAO	-
ROA	- MASSA ESPECIFICA DA AGUA	Eks/m ³
ROAR	- MASSA ESPECIFICA DO AR	Eks/m ³
ROARCL	- MASSA ESPECIFICA DO AR (camada limite)	Eks/m ³
ROAR1	- MASSA ESPECIFICA DO AR (anterior)	Eks/m ³
ROAP	- MASSA ESPECIFICA DO CARVAO (aparente)	Eks/m ³
ROC	- MASSA ESPECIFICA DO CARVAO	Eks/m ³
ROCI	- MASSA ESPECIFICA DAS CINZAS	Eks/m ³
ROVOL	- MASSA ESPECIFICA DOS VOLATELAS (solido)	Eks/m ³
RE	- NUMERO DE REYNOLDS	-
SC	- NUMERO DE SCHMIDT	-
SI	- SUPERFICIE INTERNA / VOLUME	Em ² /m ³
SIGMA	- CONSTANTE DE STEFFAN-BOLTZMAN	EW/m ² .K ⁴
T	- TEMPERATURA	CKJ
TO	- TEMPERATURA DA SUPERFICIE DA PARTICULA	CKJ
TEMPO	- TEMPO TOTAL DE CALCULO	s
TH	- MODULO DE THIELE	-
TINF	- TEMPERATURA DO AR CIRCUNDANTE	CKJ
TINFS	- TEMPERATURA DE ENTRADA DO AR SECUNDARIO	CKJ
TP	- TEMPERATURA DA PAREDE	CKJ
T1	- TEMPERATURA	CKJ
U	- VELOCIDADE DO ESCOAMENTO	Em/s
V	- VOLUME DA PARTICULA	Em ³
VE	- VOLUME DE AR A VOLTA DE CADA PARTICULA	Em ³
VFP	- VOLUME DE AR PRIMARIO	Em ³
VEL	- VELOCIDADE (diferenca partic-escoamento)	Em/s
VFL1	- VELOCIDADE (positiva ou negativa)	Em/s
VP	- VELOCIDADE DA PARTICULA	Em/s

INTICIACAO DE VARIAVELIS

DTEMPO=1.000000E-4

TEMPO=0

C=0

CA=0

CAR=0

CC=0

CO=0

CVAP=0

D=0

DJ=0

DO=0

DT=0

DW=0

G=0

```

GF=0
GI=0
GOX=0
H=0
HB=0
HLV=0
HV=0
HVAP=0
HVOL=0
K=0
KL=0
KAPA=0
L=0
LAMRIAR=0
GAMAVAP=0
LVAP=0
MV=0
MON=0
NTUAR=0
NTUARCL=0
POSI=0
PR=0
PSAT=0
OO=0
RE=0
ROAR=0
ROAR1=0
ROARCL=0
RE=0
SC=0
TH=0
TIO=0
TIN=0
POS=0
TII=0
TIII=0
RENDI=0
REND=1
RENDIM=0.9
PI=3.14159
ROA=1000
ROVOL=1000
ROC=1200
ROCT=2600
PRINT*, " DUAL O DIAMETRO DA PARTICULA ?(em microns) "
READ*, DIA
DTAM=DIA*1E-6
PRINT*, " DUAL A PERCENTAGEM DE AGUA ? "
READ*, PA
PRINT*, " DUAL A PERCENTAGEM DE VOLATETS ? "
READ*, PVOL
PRINT*, " DUAL A PERCENTAGEM DE CTNZA ? "
READ*, PCI
PCA=100-PA-PVOL-PCI
IF ((DIA.LE.0),OR,(PA.LT.0),OR,(PVOL.LT.0),OR,(PCI.LT.0),OR,
+ (PCA.LT.0)) STOP
PRINT*, " DUAL O EXCESSO DE AR ?(em percentagem) "
READ*, POXP
POX=POXP/100
PRINT*, " DUAL A TEMPERATURA INICIAL DA PARTICULA ?( C ) "

```

```

READ#T
TO=T+273
PRINT#," DUAL A TEMPERATURA DO AR PRIMARIO ?(C) "
READ#T
TINF=T+273
PRINT#," DUAL A TEMPERATURA DO AR SECUNDARIO ?(C) "
READ#T
TINFS=T+273
T=TO
TT=TINF
PRINT#," DUAL O COMPRIMENTO DA CAMARA DE COMBUSTAO ?(m) "
READ#POSE
WRITTE(12,16) RIA,PA,PVOL,PCI,PCA,POXP,TINFS
RO=DIAM/2
V=4./3.*PI*RO*RO*3
PA=PA/100
PVOL=PVOL/100
PCA=PCA/100
PCI=PCI/100
MT=V/(PA/ROA+PVOL/ROVOL+PCA/ROC+PCI/ROCI)
MATNT=PA*MT
MMVINI=PVOL*MT
MCINTI=PCA*MT
MCJ=PCI*MT
A=4*PI*RO*RO
TP=1000
P=1.0332
CALL ROBOAR(TINF,TO,ROAR,ROAR1,TEMPO,BTEMPO,ROARCL)
MA=MAINI
MC=MCINT
MMV=MMVINI
MCO=MCINTI+MMVINI
MOX=0.232
MVAPTNF=0.007
MAZOT0=0.761
E1=73.67E6
E2=251.16E6
R1=3.7E5
B2=1046E13
ALFA1=0.39
ALFA2=0.8
R=8314
ICH4=0.25
IH2=0.125
HCH4=50.18E6
HH2=121E6
PCH4=0.509
PH2=0.132
3 PRINT#," conhece a percentagem de H2 e CH4 nos volatéis ?(S-sim) "
READ#,"(A)"> JJ
IF (JJ, NF, "S") GO TO 5
PRINT#," DUAL A PERCENTAGEM DE HIDROGENIO ? "
READ#PH2
PRINT#," DUAL A PERCENTAGEM DE METANO ? "
READ#PCH4
IF ((PH2+PCH4).LT.100) GO TO 4
PRINT#,"a soma nao pode ser superior a 100%"
PRINT#
GO TO 3
4 PH2=PH2/100

```

PCH4=PCH4/100
 5 HC=25E6
 R=595.7
 E=149.5E6
 SI=20
 I=12./16.
 ICO2=12./32.
 TU=PCH4*TCH4+PH2*TH2
 MON=MMV/JV+MCINT/ICO2
 MAR=MON/MOX*(1+POX)
 MARP=0.3*MAR
 MOP=MARP*MOX
 VE=MAR/ROAR
 MO=MAR*MOX
 MOINI=MO
 VP=6
 U=5
 EPSILON=0.85
 F=0.7
 SIGMA=5.67E-8
 VEL1=VP-U
 VEL=ABS(VEL1)
 MM=0
 MMM=0
 MMMM=0
 MMMMM=101

C
C
C

PROGRAMA

```

      PRINT#1,"--TEMPO--T,JA PART-T,DO AR--AGUA---CARVAO--VOLATEIS-
+OXIGENIO-VEL PART-VEL ESC-POS--"
      WRITE(12,*),"--TEMPO--T,JA PART-T,DO AR--AGUA---CARVAO--VOLATEIS-
+OXIGENIO-VEL PART-VEL ESC-POS--"
50     WRITE(6,11) TEMPO,TO,TINF,MA,MC,MMV,MO,VP,U,POS
      WRITE(12,11) TEMPO,TO,TINF,MA,MC,MMV,MO,VP,U,POS
      PRINT#,GF,DW,DTEMPO
      M=0
10     M=M+1
      IF (TIO.GT.TO) GO TO 33
      TIO=TO
33     IF (TIN.GT.TINF) GO TO 32
      TIN=TINF
32     IF (TO.LE.(T+5.),OR.TINF.LE.(TI+5.)) GO TO 330
      DTEMPO=DTEMPO/10
330    T=TO
      TI=TINF
      IF (R.GE.MMMMM) GO TO 50
      TEMPO=TEMPO+DTEMPO
      CALL ROODAR (TINF,TO,ROAR,ROARI,TEMPO,DTEMPO,ROARCL)
      CALL NIUODAR (TINF,TO,NIUAR,NIUARCL)
      CALL CARODAR (TINF,TO,CAR,CARCL)
      CALL LAMODAR (TINF,TO,LAMODAR)
      CALL VELOCIDAAR (VEL,VP,U,PI,NIUAR,RO,MA,MC,ROAR,ROARI,VEL1,
+ DTEMPO,MMV,MCT)
      RENDI=1.-(MC*HC+MMV*HVOL)/(MCINT*HC+MMV*TNT*HVOL)
      IF (RENDI.LT.RENDIM) GO TO 333
      III=III+1
      IF (III.EQ.1) THEN
          POST=POS
      END IF
  
```

333 IF (POS, GE, POSF) THEN
 TI=TI+1
 IF (TI, LE, 1) THEN
 REND=1. - (MC*HC+MMV*HVOL) / (MCINT*HC+MMVINT*HVOL)
 END IF
 END IF
 POS=POS+VP*DTEMPO
 CALL CALORCARVAO (TO, CC)
 CALL CALORCARVAO (TO, CCT)
 C F=EXP (-ROAR/(1.+POX))
 RE=ROAR*VEL*RO*2/NTIAR
 PR=NTIARCL*CARCL/LAMBRAR
 IF ((MA/MAINI) .LE. 1E-4) GO TO 20
 CALL LAMBRAVAFAVOR (TINF, TO, LVAP)
 CALL CALORVAPOR (TINF, TO, CVAP)
 GAMAVAP=LVAP/CVAP
 S=0
 CALL FRAMINE (MVAPINF, MAZOTO, MOX, G, DITEMPO, ROAR, VEP, MARP)
 CALL CALORAGUA (TO, CA)
 CALL CALORVAPORTZACAO (L, TO)
 CALL DIFUSAO (TINF, TO, B)
 SC=NTIARCL/ROARCL/D
 CALL EVAPORACAO (A, CA, CAR, CC, CVAP, DT, DITEMPO, G, GAMAVAP, HV, L,
 + LVAP, MA, MAINI, MARP, MAZOTO, HC, MM, MMMMM, MOP, MOX, MVAP0, MVAPINF,
 + P, PR, PSAT, DO, RO, RE, ROAR, SC, TO, TINF, VEP, MMV, MC1, CCT,
 + D, PT, RDA, U, VA, MOINT)
 IF (MA/MAINI.LE. 1E-4) THEN
 PRINT*, " O SLURRY JA SECOU "
 DITEMPO=1D-4
 WRTTE(6,11) TEMPO, TO, TINF, MA, MC, MMV, MO, VP, U, POS
 WRITE(12,13) TEMPO, TO, TINF, MA, MC, MMV, MO, VP, U, POS
 CALL CALORAR (TINF, TO, C1, C1CL)
 CALL CALORAR (TINF, TO, C2, C2CL)
 HT=(MARP*C1*TINF+(MAR-MARP)*C2*TINF)/MAR
 T=(TINF+TINF)/2.
 CALL CALORAR (T, TO, C3, C3CL)
 T1=HT/C3
 IF (ABS(T-T1).GT. 0.1) THEN
 T=T1
 GO TO 301
 END IF
 TINF=T1
 MOX=0.232
 MO=MAR*MOX
 US=5
 U=US
 CALL ROARAR (TINF, TO, ROAR, ROAR1, TEMPO, DITEMPO, ROARCL)
 POSS=POS
 WRTTE(6,11) TEMPO, TO, TINF, MA, MC, MMV, MO, VP, U, POS
 WRITE(12,11) TEMPO, TO, TINF, MA, MC, MMV, MO, VP, U, POS
 ELSE
 GO TO 10
 END IF
 C
 C
 20 TF ((MMV/MMVINT).LE. 1E-2) GO TO 30
 CALL VOLATEIS (A, ALFA1, ALFA2, B1, B2, C, CA, CAR, CC, CO,
 + DITEMPO, RW, F1, F2, EPSILON, F, HVOL, TV, K1, K2, LAMBRAR, MA, MAR, MC,
 + MCO, MM, MMMMM, MMV, MO, MOX, PR, DE, R, RO, RE, ROAR, SIGMA, TO,
 + TEMPO, TINF, TP, U, VE, VP, MCT, CCT, POS, HH2, HCH4, PH2, PCH4, MOINT, MMVINT,

```

* POSI, RENDT, RENDIM)
  IF ((MMV/MMVTNT.LE.1F-2) THEN
    PRINT*, " EXTINGUIRAM-SE OS VOLATEIS "
    WRTTE(6,11) TEMPO, TO, TINF, MA, MC, MMV, MO, VP, U, POS
    WRTTE(12,14) TEMPO, TO, TINF, MA, MC, MMV, MO, VP, U, POS
    DTEMPO=1D-4
  ELSE
    GO TO 10
  END IF

30  CALL DIFUSA00X (TO, TO, DO)
  CALL DIFUSA00X (TO, TINF, DO)
  SC=NTUARCL/ROARCL/DO
  CO=0
  CALL CONCENTRACAO (C, ROAR, CO, MOX, VE, TEMPO, TO, TINF, MMV, VP, U, MA,
+ MC, MAR, MO, POS, PCT, PVOL, PCA, MT, MCT, POSE, REND, POSS, TIN, TIO, MINTI,
+ POSI, RENDT, RENDIM)
  CALL QUEIMA (A, B, C, CAR, CC, CO, DI, DO, DTEMPO, E, EPSILON,
+ F, GF, GOX, H, HC, HR, I, K, KAPA, KL, LAMBAR, MA, MAR, MC, MCINTI, MMMM, MMMMM,
+ MMV, MO, MOX, PR, R, RO, RE, ROAR, SC, SI, SIGMA, TO, TEMPO, TH, TINF,
+ TP, U, VF, VP, MOO, GFF, IC02, MCT, CCT, POS, V, PT, RT,
+ PCT, PVOL, PCA, MT, MCT, POSE, REND, POSS, TIN, TIO, ROARCL, MINTI, POSI,
+ RENDT, RENDIM)
  IF (RENDIM.GE.RENDT) GO TO 10
  IF ((MC/MCINTI).GE.1F-2) GO TO 10
  PRINT*, "ACABOU A COMBUSTAO DA PARTICULA NO TEMPO DE ", TEMPO
  WRTTE(6,11) TEMPO, TO, TINF, MA, MC, MMV, MO, VP, U, POS
  WRTTE(12,15) TEMPO, TO, TINF, MA, MC, MMV, MO, VP, U, POS
  MT=MC+MMV+MCT
  PCJ=MCT/MT*100
  PVOL=MMV/MT*100
  PCA=MC/MT*100
  WRTTE(12,17) PCT, PVOL, PCA
  WRTTE(6,17) PCJ, PVOL, PCA
  WRTTE(12,18) POSE, REND, POSS
  WRTTE(6,18) POSE, REND, POSS
  WRTTE(12,21) RENDIM, POSI
  WRTTE(6,21) RENDIM, POSI
  WRTTE(6,19) TIO, TIN
  WRTTE(12,19) TIO, TIN

11  FORMAT ("F7.4,"," ",F7.1," ",F7.1," ",F7.2," ",F7.2," ",F7.2,
+ " ",F8.3," ",F7.3," ",F7.3,F6.3)
13  FORMAT (" O SLURRY JA SECOU"/ F7.4," ",F7.1," ",F7.1," ",F7.2,
+ " ",F7.2," ",F7.2," ",F8.3," ",F7.3," ",F7.3,F6.3)
14  FORMAT (" ACARARAM OS VOLATEIS"/ F7.4," ",F7.1," ",F7.1," ",
+ " ",F7.2," ",F7.2," ",F8.3," ",F7.3," ",F7.3,F6.3)
15  FORMAT (" ACAROU A COMBUSTAO"/ F7.4," ",F7.1," ",F7.1," ",F7.2,
+ " ",F7.2," ",F7.2," ",F8.3," ",F7.3," ",F7.3,F6.3/)
16  FORMAT (" DTAMFTR DO SLURRY = ",F5.1," microns"/" AGUA = "
+ ,F5.1," %"/" VOLATEIS = ",F5.1," %"/" CINZA = ",F5.1," %"/
+ " CARVAO FTXO = ",F5.1," %"/" EXCESSO DE AR = ",F5.1," %"/
+ " TEMP. DO AR SECUNDARIO = ",F7.1," K/")
17  FORMAT (" CONSTITUICAO DA PARTICULA FINAL: "/" CINZA = ",F5.1,
+ " % , VOLATEIS = ",F5.1," % , CARVAO = ",F5.1," %/")
18  FORMAT (" O RENDIMENTO AO FIM DE ",F4.1," metros, SERA DE ",F5.3
+ ,"/" A ENTRADA DE AR SECUNDARIO DEVE SER POSTICIONADA A ",F5.2,
+ " metros DO INJECTOR ")
19  FORMAT (" TEMPERATURA MASSIMA DA PARTICULA : ",F7.1," DO AR : ",F7.1,///
21  FORMAT (" O RENDIMENTO DE ",F4.2," SERA OBTIDO AO FIM DE ",F5.2," metros

```

END

C

C SUBROTINAS

C

C

SUBROUTINE EVAPORACAO (A,CA,CAR,CC,CVAP,TIT,DTEMPO,G,
+ GAMAVAP,HV,L,LVAP,MA,MAINT,MAR,MAZOTO,MC,MM,MMMM,MO,
+ MOX,MVAPO,MVAPTNF,P,PR,PSAT,DO,RO,RE,ROAR,SC,TO,TINF,VE,
+ MMV,MCT,CCT,D,PT,ROA,V,VA,MOINT)
REAL#8 TO,P,MVAPO,MA,MAINT,GAMAVAP,RO,MVAPO,MLVAPO,MVAPTNF,RE,
+ PR,CVAP,L,VAP,SC,A,DTEMPO,G,HV,DO,TINF,DT,L,MC,CC,CA,PSAT,VE,
+ ROAR,CAR,DTEM,GI,HLU,MAR,MO,MOX,MAZOTO,MMV,MCT,CCT,DINT,PORO,
+ VA,S,GTD,B,PT,ROA,V,MOINT
IF (MA/MAINT.GT.30E-4) GO TO 300

300

DTEMPO=1D-5

IF (MA/MAINT.GT.20E-4) GO TO 310

DTEMPO=1D-6

310

MM=MM+1

IF (MM.LE.MMM) GO TO 60

MM=0

PRINT#, "EVAPORACAO"

60

CALL PRESSAOSSATURACAO (TO,PSAT)

MLVAPO=PSAT/P

MVAPO=MLVAPO

GL=GAMAVAP/RO*DLOG ((1-MVAPTNF)/(1-MVAPO))

G=GL*(1.+CO.278*RE*H0.5*PRH*(1./3.))/(1.+1.232/RE/PRH*(4./3.))*H0.5

S=MA/MAINT

VA=MAINT/ROA

PORO=VA/V

DTNT=D*PORO*H(3./2.)*(1.-S)

GTD=PJ*PI*DINT*H(2./4.)/RO/RO*(MVAPO-MVAPTNF)*VA/A

IF (GTD.LT.6) GO TO 210

G=GTD

210

CALL FRAMINF(MVAPTNF,MAZOTO,MOX,G,A,DTEMPO,ROAR,VE,MAR)

HV,V=CVAP*G/(DEXP(CVAP*G*RO/LVAP)-1)

HV=HV*V*(1.+CO.278*RE*H0.5*PRH*(1./3.))/(1.+1.232/RE/PRH*(4./3.))*H0.5

MA=MA-G*H*DTEMPO

DO=HV*(TTNF-TO)

DT=(DO-G*H)*A/(MC+CC+MA+CA+MMV+CC+MCT+CCT)*DTEMPO

TO=TO+DT

100

TTNF=TTNF-DO/MAR/CAR*DTEMPO

RETURN

END

C

C

SUBROUTINE VOLATEIS (A,ALFA1,ALFA2,B1,B2,C,CA,CAR,CC,CO,

+ DTEMPO,DW,E1,E2,EPSON,F,HVOL,IV,K1,K2,LAMBDA,R,MA,MAR,MC,

+ MCO,MM,MMMM,MMV,MO,MOX,PR,DE,R,RO,RE,ROAR,SIGMA,TO,

+ TEMPO,TINF,TP,U,VE,VP,MCT,CCT,POS,HH2,HCH4,PH2,PCH4,MOINT,MMVINT,

+ POSI,RENINT,RENINTM)

REAL#8 TO,E1,E2,B1,B2,ALFA1,ALFA2,K1,K2,R,DW,DTEMPO,VE,DE,HVOL,

+ TINF,CAR,ROAR,MCO,MC,CO,IV,MOX,C,LAMBDA,R,RF,PR,A,H,UV,

+ MA,CA,CC,R,STGMA,EPSON,F,TP,DTEM,D,TEMPO,MMV,VP,U,MAR,MO,

+ MCT,CCT,POS,HH2,HCH4,CP02,CPH2,CPH20,CPH20,CPCH4,TPH2,TPCH4,

+ TRH2,IRCH4,DHR1H2,DHR2H2,DHR1CH4,DHR2CH4,PH2,PCH4,MOINT,MMVINT,

+ POSI,RENINT,RENINTM

IF (MMV/MMVINT.GT.30E-2) GO TO 80

DTEMPO=1D-5

```

80      IF (MMV/MMVINT.GT.15E-2) GO TO 81
       DTEMPO=1E-6
       GO TO 70
81      MMM=MMN+1
       JF (MMN.LE.MMMMM) GO TO 70
       MMM=0
       DTEMPO=1E-4
C      PRINT*, " VOLATILIZACAO"
70      CALL CALOR02 (TO,CPO2,AA1,BB1,CC1,BB1)
       CALL CALORH2 (TO,CPH2,AA2,BB2,CC2,BB2)
       CALL CALORH20 (TO,CPH20,AA3,BB3,CC3,BB3)
       CALL CALORCO2 (TO,CPCB2,AA4,BB4,CC4,BB4)
       CALL CALORCH4 (TO,CPCB4,AA5,BB5,CC5,BB5)
       IRH2=2./3.*(AA2*(TO-278)+BB2*(TO#2-278#2)+CC2*(TO#3-278,#3)+  

+ BB2*(TO#4-278,#4))+1./3.*(AA1*(TO-278)+BB1*(TO#2-278#2)+  

+ CC1*(TO#3-278,#3)+BB1*(TO#4-278,#4))  

       IPH2=AA3*(TO-278.)+BB3*(TO#2-278.#2)+CC3*(TO#3-278,#3)+  

+ BB3*(TO#4-278,#4)  

       IRCH4=1./3.*(AA5*(TO-278)+BB5*(TO#2-278#2)+CC5*(TO#3-278,#3)+  

+ BB5*(TO#4-278,#4))+2./3.*(AA1*(TO-278)+BB1*(TO#2-278#2)+  

+ CC1*(TO#3-278,#3)+BB1*(TO#4-278,#4))  

       PCCH4=2./3.*(AA3*(TO-278)+BB3*(TO#2-278#2)+CC3*(TO#3-278,#3)+  

+ BB3*(TO#4-278,#4))+1./3.*(AA4*(TO-278)+BB4*(TO#2-278#2)+  

+ CC4*(TO#3-278,#3)+BB4*(TO#4-278,#4))  

       DHR1H2=HH2  

       DHR1CH4=HCH4  

       DHR2H2=DHR1H2+(IPH2-1.5*IRH2)  

       DHR2CH4=DHR1CH4+(3.*PCCH4-3.*IRCH4)  

       HVOL=PCH4*DHR2CH4+PH2*DHR2H2  

       K1=B1*DEXP(-E1/R/TO)  

       K2=B2*DEXP(-E2/R/TO)  

       CALL RESOL (DW,DTEMPO,ALFA1,ALFA2,K1,K2,MCO)  

       QF=DW*HVOL  

       R=LAMBALAR/R0/2.+C2.+0.6*RE#R0.5*PR#R*(1./3.)  

       Q=A#R*(TO-TINF)*DTEMPO  

       TINF=TINF+(QF+Q)/CAR/MAR  

       DV=-Q+STGMA#EPSILON#F#A*(TR#4-TO#4)*DTEMPO  

40      TO=TO+DV/(MC*CC+MMV*CC+MCT*CCT)  

       MAR=MAR+DQ  

       MMV=MMV-DQ  

       CO=DW/JV  

       CALL CONCENTRACAO (C,ROAR,CO,MOX,VE,TEMPO,TO,TINF,MMV,VP,U,MA,  

+ MC,MAR,MO,POS,PCT,PVOL,PCA,MT,MCT,POSF,RENII,POSS,TTN,TTO,MONT,  

+ POST,RENII,RENIDIM)  

       RETURN  

       END

```

C C

```

SUBROUTINE QUETMA (A,B,C,CAR,CC,CO,DT,DI,DTEMPO,F,EPSILON,
+ F,GF,GOX,H,HC,HD,I,K,KAPA,KL,LAMBALAR,MA,MAR,MC,MCINT,MMMM,MMMM,
+ MMV,MO,MOX,PR,R,RO,RE,ROAR,SC,SI,STGMA,TO,TEMPO,TH,TINF,
+ TP,U,VE,VP,MOO,GFF,IC02,MCI,CCI,POS,V,PI,DT,
+ PCT,PVOL,PCA,MT,MCT,POSF,RENII,POSS,TTN,TTO,ROARCL,MONT,POST,
+ RENII,RENIDIM)
      REAL#8 K,R,TO,F,R,HD,SI,DI,RO,RE,SC,C,GOX,GF,I,KAPA,TF,
      TINF,MC,HC,A,DTEMPO,CD,CAR,VE,ROAR,MOX,CC,H,STGMA,EPSILON,F,TP,
      LAMBALAR,PR,K1,K2,K3,K4,DTEMPO,T,TEMPO,MMV,VP,U,MA,MAR,MO,O,QQ,OC,
      MC02,GFF,MCINT,IC02,MCI,CCI,POS,KC,EC,DT,KD1,KD,ROAR,RI,V,PI,
      PCT,PVOL,PCA,MT,MCT,POSF,RENII,POSS,TTN,ROARCL,MONT,POST,RENII,
      RENIDIM

```

```

      IF (TINF.GT.1300) GO TO 60
      DTENPO=10--3
60   MMMM=MMMM+1
      IF (MMMM.LE.MMMMM) GO TO 80
      MMMM=0
      DTENPO=10--4
      PRINT*, " DUEIMA"
80   H=LAMBDA/R0/2.*C2.+0.6*RE**0.5*PR**0.1./3.)
      T=T0
      K=BT0*DEXP(-E/R/T0)
      TH=(STK/BT)*0.5*R0
      IF (TH.GE.0.55) THEN
          KL=K
      ELSE
          KL=K*(1+ST*R0/3)
      END IF
      ROAP=MCTINT/V
      EC=(3.*MCTINT/ROAP/4.*PI)**0.1./3.)-(3.*MC/ROAP/4.*PI)**0.1./3.)
      IF (EC.EQ.0) THEN
          EC=1E-20
      END IF
      KC=BT/EC
      RD=BT*ROARCL/R0/2.*C2.+0.6*RE**0.5*SC**0.1./3.)
      KB=HD*DL0G(1.+IMOX)/TC02/C
90   MC02=(KL+KC)*(KTHMOX/(KL+KC+KL+KD+KC*KB))
      KB1=HD*DL0G((MOX+1./T)/(MC02+1./T))/TC02/C
      IF (DABS(KB-KB1).GT.(KB/100.)) THEN
          KB=KB1
          GO TO 90
      END IF
      KAPA=1/(1/KL+1/KC+1/KD)
      GOX=KAPA*C
      GF=GOX*TC02
      MC=MC-GF*H*DTENPO
      CO=GOX*H*DTENPO
      CALL CONCENTRACAO (C,ROAR,CO,MOX,UF,TEMPO,T0,TINF,MV,VP,IS,MA,
+ MC,MAR,MD,POS,PCT,PVOL,PCA,MT,MCI,POSE,REN0,POSS,TIN,TIO,MINT,
+ POSI,RENIT,RENIM)
      Q=A*H*(TINF-T0)*DTENPO
      QC=Q+STGMA*EPSILON*(T**4-T0**4)*DTENPO
      TO=T0+QC/(MC+CO+MC1+CCT)
102  TTINF=TTINF-Q/MAR/CAR
      RR=GF*H*CO*DTENPO
      TF=(RR+CO*(TC02+1/MOX)*CAR*TINF+(MC+CO+MC1+CCT)*TO)/(CO*
+ (TC02+1/MOX)*CAR+(MC+CO+MC1+CCT))
      TO=TF
      TINF=(MAR-CO/MOX)*TINF+CO*(TC02+1/MOX)*TF/(MAR+CO*TC02)
      MAR=MAR+GF*H*DTENPO
      RETURN
      END

C
C
C
      SUBROUTINE PRESSAOSSATURACAO (TO,PSAT)
      EK*F/cm2J
      RFAL#8 TO,PSAT,A,B,C,D,T
      T=T0-273.15
      IF (T.LT.100) GO TO 130
      T=100
130  A=-0.072834438
      B=7.5379133E-3

```

C=-1.7784929E-4
 N=2.130736E-6
 $PSAT = A + B*T + C*T^2 + D*T^3$
 RETURN
 END

C
 C
 SURROUNTING CALORCARVAO (T0,CC)
 C
 REAL#8 T0,CC,A,B,C,D
 $T = T0 - 273.15$
 IF (T.LE.3900) GO TO 300
 $T = 3900$
 300 A=825.12221
 B=1.8924237
 $C = -9.5372836E-4$
 $D = 1.6570014E-7$
 $CC = A + B*T + C*T^2 + D*T^3$
 RETURN
 END

C
 C
 SURROUNTING CALORAGUA (T0,CA)
 C
 REAL#8 T0,CA,A,B,C,D,T
 $T = T0 - 273.15$
 IF (T.LE.100) GO TO 140
 $T = 100$
 140 A=4.229
 B=-3.7083339E-3
 $C = 8.0000014F-5$
 $D = -4.7916664E-7$
 $CA = (A + B*T + C*T^2 + D*T^3) * 1000$
 RETURN
 END

C
 C
 SURROUNTING CALORVAPOR (TINF,T0,CVAP)
 C
 REAL#8 TINF,CVAP,A,B,C,D,T,T0
 $T = (TINF + T0) / 2 - 273.15$
 IF (T.LE.1000) GO TO 150
 $T = 1000$
 150 A=1.9652
 B=-1.8433342E-4
 $C = 1.4550002E-6$
 $D = -8.1666687E-10$
 $CVAP = (A + B*T + C*T^2 + D*T^3) * 1000$
 RETURN
 END

C
 C
 SURROUNTING LAMBRIVAPOR (TINF,T0,LVAP)
 C
 REAL#8 TINF,LVAP,A,B,C,D,T,T0
 $T = (TINF + T0) / 2 - 273.15$
 IF (T.LE.1000) GO TO 210
 $T = 1000$
 210 A=12.453
 $B = 0.10342835$

```
C=8.9249672E-6
B=2.8916694E-8
LVAR=(A+B*T+C*T*T+D*T*T*T)/1000
RETURN
END
```

C

C SUBROUTINE LAMBRAR (TINF, TO, LAMBRAR)

```
C K/m, KJ
REAL*8 TINF,LAMBRAR,A,B,C,D,T,TO
T=(TINF+TO)/2-273.15
IF (T.LE.3000) GO TO 160
T=3000
160 A=0.024397862
B=6.4610445E-5
C=-1.6255374E-8
D=3.6472474E-12
LAMBRAR=A+B*T+C*T*T+D*T*T*T/1000
RETURN
END
```

C

C SUBROUTINE NTUOAR (TINF, TO, NTUAR, NTUARCL)

```
C K/m23
REAL*8 TINF,NTUAR,A,B,C,D,T,TO,NTUARCL
T=TINF-273.15
IF (T.LE.3000) GO TO 170
170 A=1.6720988E-5
B=4.5007407E-8
C=-1.58703703E-11
D=3.2098746E-15
NTUAR=A+B*T+C*T*T+D*T*T*T/1000
T=(TINF+TO)/2-273.15
NTUARCL=A+B*T+C*T*T+D*T*T*T/1000
RETURN
END
```

C

C SUBROUTINE CALORAR (TINF, TO, CAR, CARCL)

```
C KJ/kg, KJ
REAL*8 TINF,CAR,A,B,C,D,T,TO,CARCL
T=TINF-273.15
IF (T.LE.3000) GO TO 180
T=3000
180 A=1.00908575
B=1.2866667E-4
C=5.0000123E-9
D=-2.3806975E-12
CAR=(A+B*T+C*T*T+D*T*T*T/1000)*1000
T=(TINF+TO)/2-273.15
CARCL=(A+B*T+C*T*T+D*T*T*T/1000)*1000
RETURN
END
```

C

C

C SUBROUTINE ROORAR (TINF, TO, ROAR, ROAR1, TEMPO, RTEMPO, ROARCL)

```
C KJ/m33
REAL*8 TINF,ROAR,ROAR1,TEMPO,RTEMPO,TO,ROARCL
ROAR1=ROAR
ROAR=1./TTNF*9.80665E4/287.
```

```

IF (TEMPO,ER,BTEMPO) THEN
    ROAR1=ROAR
END IF
ROAR1=1./ (TINF+TO)*2.*9.80665E4/287.
RETURN
END

```

SUBROUTINE CONCENTRACAO (C,ROAR,CO,MOX,VE,TEMPO,TO,TINF,MMV,VP,
+ U,MA,MC,MAR,MO,POS,PCI,PVOL,PCA,MT,MCI,POSE,REND,POSS,TIN,TIO,
+ MOINT,POST,RENIT,RENDIM)

(kgs/m³)

REAL*8 C,ROAR,CO,MOX,VE,TEMPO,TO,TINF,MMV,VP,U,MA,MC,MAR,MO,POS,
+ PCI,PVOL,PCA,MT,MCI,POSE,REND,POSS,TIN,MOINT,POST,RENIT,RENDIM

MO=MO-CO

MOX=MO/MAR

IF (MO/MOINT,LE,2E-2) THEN

PRINT*, " DEIXOU DE HAVER OXIGENTO "

WRITTE(6,12) TEMPO,TO,TINF,MA,MC,MMV,MO,VP,U,POS

WRITTE(12,16) TEMPO,TO,TINF,MA,MC,MMV,MO,VP,U,POS

MT=MC+MMV+MCI

PCI=MCI/MT*100

PVOL=MMV/MT*100

PCA=MC/MT*100

WRITTE(12,17) PCI,PVOL,PCA

WRITTE(6,17) PCI,PVOL,PCA

WRITTE(12,18) POSE,REND,POSS

WRITTE(6,18) POSE,REND,POSS

IF (RENDI,LT,RENDIM) THEN

WRITTE(12,22) RENDI

WRITTE(6,22) RENDI

ELSE

WRITTE(12,21) RENDIM,POST

WRITTE(6,21) RENDIM,POSI

END IF

WRITTE(6,19) TIO,TIN

WRITTE(12,19) TIO,TIN

17 FORMAT (" CONSTITUICAO DA PARTICULA FINAL: "/" CINZA = ",F5.1,
+ " % , VOLATETS = ",F5.1," % , CARVAO = ",F5.1," %")

18 FORMAT (" O RENDIMENTO AO FIM DE ",F4.1," metros, SERA DE ",F5.3
+ ,"/" A ENTRADA DE AR SECUNDARIO DEVE SER POSICIONADA A ",F5.2,
+ " metros DO INJECTOR ")

19 FORMAT (" TEMPERATURA MASSIMA DA PARTICULA : ",F7.1," DO AR: ",F7.1,///

12 FORMAT (F7.4," ",F7.1," ",F7.1," ",E7.2," ",E7.2," ",E7.2,
+ " ",F8.3," ",F7.3," ",F7.3,F6.3)

16 FORMAT (" ACABOU O OXIGENTO"/ F7.4," ",F7.1," ",F7.1," ",E7.2,
+ " ",E7.2," ",F7.2," ",F8.3," ",F7.3," ",F7.3,F6.3,///)

21 FORMAT (" O RENDIMENTO DE ",F3.2," SERA OBTIDO AO FIM DE ",F5.2," metros
22 FORMAT (" O RENDIMENTO FINAL DA QUETMA FOI DE ",F3.2)

STOP

END IF

C=MOX*ROAR

RETURN

END

SUBROUTINE CALORVAPORTZACAO (L,TO)

(J/Kg)

REAL*8 L,TO,HL,HVAP,A,B,C,D,T,F,F,G,R

T=TO-273.15

IF (T,LE,100) GO TO 200

T=100

200 A=0.19422194

B=4.1908256

C=-3.3222275E-4

D=3.1444406E-6

HL=(A+B*T+C*T*T+D*T*T*T)*1000

E=2499.102

F=1.93426

G=-1.67444004E-3

H=9.5367432E-13

HVAP=(F+E*T+G*T*T+H*T*T*T)*1000

L=HVAP-HL

RETURN

END

SUBROUTINE DIFUSAO (TINF,T0,D)

[m²/s]

REAL*8 T0,D,M,DO,TINF

DO=0.23E-4

M=2

D=DO*((TINF+T0)/2./298)*M

RETURN

END

SUBROUTINE DIFUSA00X (T0,TINF,DO)

[m²/s]

REAL*8 T0,DO,M,DO,TINF,T

T=(T0+TINF)/2

DO=0.18E-4

M=1.75

DO=DO*(T/298)*M

RETURN

END

SUBROUTINE RESOL (DW,BTEMP0,ALFA1,ALFA2,K1,K2,MC0)

[k⁴s]

REAL*8 DW,BTEMP0,ALFA1,ALFA2,K1,K2,MC0,A1

A1=(K1+K2)*BTEMP0

DW=(ALFA1*K1+ALFA2*K2)*EXP(-A1)*BTEMP0*MC0

RETURN

END

SUBROUTINE VELOCIDADE (VEL,VP,U,PI,NTUAR,RO,MA,MC,ROAR,ROAR1,

+ VEL1,BTEMP0,MMV,MCT)

[m/s]

REAL*8 VEL,VP,U,PI,NTUAR,RO,MA,MC,ROAR,ROAR1,VEL1,V,K1,K2,K3,K4,

+ BTEMP0,MMV,MCT

FV(V)=-5*PI*NTUAR*RO/(MA+MC+MMV+MCT)*V-(NTUAR/(NTUAR+ROAR)*

+ 2*ROAR*V)+0.5*3*ROAR*V*PI*BTEMP0/(MA+MC+MMV+MCT)-0.2*ROAR*

+ V*V*PI*RO*RO/(MA+MC+MMV+MCT)-(1/ROAR-1/ROAR1)/BTEMP0

K1=FV(VEL1)

K2=FV(VEL1+BTEMP0*K1/2)

K3=FV(VEL1+BTEMP0*K2/2)

K4=FV(VEL1+BTEMP0*K3)

VEL1=VEL1+BTEMP0/6*(K1+2*K2+2*K3+K4)

```

VEL=UABS(VEL1)
U=U+(1/ROAR-1/ROARI)
VR=VEL1+U
RETURN
END

```

C
C
SUBROUTINE FRAMTNF (MVAPINF,MAZOTO,MOX,G,A,TITEMPO,ROAR,VE,MAR)
[J/KS/KS]

```

REAL *8 MVAPINF,MAZOTO,MOX,G,A,TITEMPO,ROAR,VE,MV,MOX1,MVAPINF1,
+ MAZOT01,MT,MAR
MOX1=MOX*MAR
MVAPINF1=MVAPINF*MAR
MAZOT01=MAZOTO*MAR
MV=G*A*TITEMPO
MVAPTNF1=MVAPINF1+MV
MAR=MOX1+MVAPINF1+MAZOT01
MOX=MOX1/MAR
MVAPINF=MVAPINF1/MAR
MAZOT0=1-MOX-MVAPINF
RETURN
END

```

C
C
SUBROUTINE CALOR02 (T0,CPO2,A,B,C,D)
[J/KS,KJ]

```

REAL *8 T0,CPO2,A,B,C,D
IF (T0.LE.1770) GO TO 220
STOP
220 A=25.477
B=15.202E-3
C=-7.1552E-6
D=1.3117E-9
CPO2=(A+B*T0+C*T0*T0+D*T0*T0)/0.032
RETURN
END

```

C
C
SUBROUTINE CALORH2 (T0,CPH2,A,B,C,D)
[J/KS,KJ]

```

REAL *8 T0,CPH2,A,B,C,D
IF (T0.LE.1770) GO TO 220
STOP
220 A=29.107
B=-1.9159E-3
C=4.0038E-6
D=-0.87044E-9
CPH2=(A+B*T0+C*T0*T0+D*T0*T0)/0.002
RETURN
END

```

C
C
SUBROUTINE CALORH20 (T0,CPH20,A,B,C,D)
[J/KS,KJ]

```

REAL *8 T0,CPH20,A,B,C,D
IF (T0.LE.1770) GO TO 220
STOP
220 A=32.238
B=1.9234E-3
C=10.555E-6

```

B=-3.5952E-9
 $CPH20 = (A+B*T0+C*T0*T0+D*T0*T0*T0)/0.018$
 RETURN
 END

C
 C
 SUBROUTINE CALORCO2 (T0,CPCO2,A,B,C,D)
 C
 REAL#8 T0,CPCO2,A,B,C,D
 IF (T0.LE.1770) GO TO 220
 STOP
 220 A=22.257
 B=59.808E-3
 C=-35.01E-6
 D=7.4693E-9
 $CPCO2 = (A+B*T0+C*T0*T0+D*T0*T0*T0)/0.044$
 RETURN
 END

C
 C
 SUBROUTINE CALORCH4 (T0,CPCH4,A,B,C,D)
 C
 REAL#8 T0,CPCH4,A,B,C,D
 IF (T0.LE.1470) GO TO 220
 STOP
 220 A=19.887
 B=50.242E-3
 C=12.686E-6
 D=-11.011E-9
 $CPCH4 = (A+B*T0+C*T0*T0+D*T0*T0*T0)/0.016$
 RETURN
 END

**A N E X O 3 -- Exemplo de Entrada de Dados e Respectivos
Resultados**

EXEMPLO DE CALCULO

QUAL O DIAMETRO DA PARTICULA ?(em microns) 70

QUAL A PERCENTAGEM DE AGUA ? 35

QUAL A PERCENTAGEM DE VOLATEIS ? 20

QUAL A PERCENTAGEM DE CINZA ? 5

QUAL O EXCESSO DE AR ?(em percentagem) 0

QUAL A TEMPERATURA INICIAL DA PARTICULA ?(°C) 20

QUAL A TEMPERATURA DO AR PRIMARIO ?(°C) 427

QUAL A TEMPERATURA DO AR SECUNDARIO ?(°C) 427

QUAL O COMPRIMENTO DA CAMARA DE COMBUSTAO ?(m) 2

conhece a percentagem de H₂ e CH₄ nos volateis ?(S-sim)

DIAMETRO DO SLURRY = 70.0 microns

AGUA = 35.0 %

VOLATEIS = 20.0 %

CINZA = 5.0 %

CARVAO FIXO = 40.0 %

EXCESSO DE AR = .0 %

TEMP. DO AR SECUNDARIO = 700.0 K

-TEMPO-T. DA PART-T. DO AR---AGUA----CARVAO--VOLATEIS-OXTGENTO-VEL. PART-VFL ESC-PO

	293.0	700.0	.70E-10	.80E-10	.40E-10	.489E-09	6.000	5.000	.0
.0100	336.0	621.8	.55F-10	.80F-10	.40F-10	.489E-09	5.182	4.773	.0
.0200	335.0	569.8	.39E-10	.80E-10	.40E-10	.489E-09	4.828	4.620	.1
.0300	332.6	530.4	.27E-10	.80E-10	.40E-10	.489E-09	4.633	4.505	.1
.0400	329.8	499.8	.18E-10	.80E-10	.40E-10	.489E-09	4.504	4.415	.1
.0500	328.5	474.8	.10E-10	.80E-10	.40E-10	.489E-09	4.409	4.342	.2
.0600	327.7	454.4	.40E-11	.80E-10	.40E-10	.489E-09	4.335	4.282	.2
.0673	327.4	441.8	.13E-12	.80E-10	.40E-10	.489E-09	4.290	4.244	.3
.0674	327.4	441.6	.80E-13	.80E-10	.40E-10	.489E-09	4.289	4.244	.3
.0675	327.4	441.5	.30F-13	.80F-10	.40E-10	.489E-09	4.289	4.243	.3

O SLURRY JA SECOU

	327.4	441.4	.66E-14	.80E-10	.40E-10	.489E-09	4.289	4.243	.3
.0676	327.4	615.6	.66E-14	.80E-10	.40E-10	.489E-09	4.289	5.000	.3
.0729	485.7	607.1	.66E-14	.80E-10	.40E-10	.489E-09	5.011	4.975	.3
.0829	584.6	602.3	.66E-14	.80E-10	.40E-10	.489E-09	4.974	4.961	.3
.0929	612.5	603.5	.66E-14	.80F-10	.40F-10	.488E-09	4.965	4.964	.4
.1029	622.6	606.6	.66E-14	.80E-10	.40E-10	.488E-09	4.969	4.974	.4
.1129	628.0	610.4	.66E-14	.80E-10	.39E-10	.487E-09	4.978	4.985	.5
.1229	632.3	614.6	.66E-14	.80E-10	.39E-10	.486E-09	4.989	4.997	.5
.1329	636.4	618.9	.66E-14	.80F-10	.39E-10	.485E-09	5.001	5.010	.6
.1429	640.7	623.6	.66E-14	.80E-10	.39E-10	.484E-09	5.015	5.023	.6
.1529	645.2	628.5	.66E-14	.80E-10	.39E-10	.483E-09	5.028	5.037	.7
.1629	649.9	633.7	.66E-14	.80E-10	.39E-10	.481E-09	5.043	5.053	.7
.1729	654.9	639.2	.66E-14	.80F-10	.38E-10	.480E-09	5.059	5.069	.8
.1829	660.3	645.2	.66E-14	.80E-10	.38E-10	.478E-09	5.076	5.086	.8
.1929	666.0	651.6	.66E-14	.80E-10	.38E-10	.476E-09	5.094	5.105	.9
.2029	672.3	658.7	.66E-14	.80E-10	.38E-10	.474E-09	5.113	5.126	.9
.2129	679.1	666.4	.66E-14	.80E-10	.37E-10	.472E-09	5.135	5.148	1.04
.2229	686.7	675.0	.66E-14	.80E-10	.37E-10	.469E-09	5.159	5.173	1.10
.2329	695.1	684.7	.66E-14	.80E-10	.36E-10	.466E-09	5.185	5.202	1.15
.2429	704.7	695.8	.66E-14	.80E-10	.36E-10	.462E-09	5.216	5.234	1.20
.2529	715.8	708.7	.66E-14	.80E-10	.35E-10	.457E-09	5.251	5.272	1.25
.2629	728.8	724.3	.66E-14	.80E-10	.34E-10	.452E-09	5.292	5.318	1.30
.2729	744.8	743.8	.66E-14	.80F-10	.33E-10	.444E-09	5.343	5.374	1.36
.2829	765.3	769.5	.66E-14	.80E-10	.32E-10	.434E-09	5.410	5.450	1.41
.2929	793.8	807.3	.66E-14	.80E-10	.30E-10	.420E-09	5.503	5.560	1.47
.3029	842.1	881.5	.66E-14	.80E-10	.26E-10	.390E-09	5.664	5.775	1.52
.3098	951.5	1220.0	.66F-14	.80E-10	.58E-11	.253E-09	6.068	6.768	1.56
.3099	957.5	1252.9	.66E-14	.80E-10	.39E-11	.239E-09	6.091	6.864	1.56
.3100	964.4	1293.0	.66E-14	.80E-10	.15E-11	.222E-09	6.116	6.981	1.56

ACABARAM OS VOLATEIS

	967.4	1311.1	.66E-14	.80F-10	.39F-12	.215E-09	6.128	7.034	1.56
.3422	1357.2	1302.9	.66E-14	.77E-10	.39E-12	.207E-09	7.003	7.009	1.79
.3882	1462.1	1362.2	.66E-14	.67E-10	.39E-12	.182E-09	7.172	7.184	2.11
.3982	1496.5	1383.2	.66E-14	.64E-10	.39E-12	.174E-09	7.231	7.246	2.18
.4082	1531.4	1407.9	.66E-14	.61E-10	.39E-12	.165E-09	7.302	7.318	2.26
.4182	1562.8	1435.7	.66E-14	.57E-10	.39E-12	.154E-09	7.383	7.399	2.33
.4282	1588.1	1464.5	.66E-14	.53E-10	.39E-12	.143E-09	7.468	7.484	2.40
.4382	1608.2	1492.8	.66E-14	.49E-10	.39E-12	.132E-09	7.553	7.566	2.48
.4482	1624.4	1519.5	.66E-14	.45E-10	.39E-12	.121E-09	7.633	7.644	2.56

,4582	1635.8	1543.5	,66E-14	,41E-10	,39E-12	,111E-09	7.705	7.715	2.63
,4682	1644.2	1564.6	,66E-14	,37E-10	,39E-12	,102E-09	7.769	7.777	2.71
,4782	1650.0	1582.5	,66E-14	,34E-10	,39E-12	,934E-10	7.823	7.829	2.79
,4882	1653.7	1597.6	,66E-14	,31E-10	,39E-12	,857E-10	7.869	7.874	2.87
,4982	1655.7	1610.0	,66E-14	,28E-10	,39E-12	,786E-10	7.906	7.910	2.94
,5082	1655.7	1619.7	,66E-14	,26E-10	,39E-12	,723E-10	7.936	7.938	3.02
,5182	1654.9	1627.3	,66E-14	,24E-10	,39E-12	,666E-10	7.959	7.961	3.10
,5282	1653.1	1632.9	,66E-14	,22E-10	,39E-12	,614E-10	7.976	7.977	3.18
,5382	1650.4	1636.9	,66E-14	,20E-10	,39E-12	,568E-10	7.988	7.989	3.26
,5482	1646.9	1639.3	,66E-14	,19E-10	,39E-12	,524E-10	7.995	7.996	3.34
,5582	1642.9	1640.5	,66E-14	,17E-10	,39E-12	,488E-10	7.999	7.999	3.42
,5682	1638.3	1640.5	,66E-14	,16E-10	,39E-12	,453E-10	7.999	7.999	3.50
,5782	1633.5	1639.5	,66E-14	,15E-10	,39E-12	,422E-10	7.997	7.997	3.58
,5882	1628.2	1637.8	,66E-14	,14E-10	,39E-12	,394E-10	7.992	7.992	3.66
,5982	1622.5	1635.3	,66E-14	,13E-10	,39E-12	,368E-10	7.985	7.984	3.74
,6082	1616.6	1632.2	,66E-14	,12E-10	,39E-12	,344E-10	7.976	7.975	3.82
,6182	1610.5	1628.5	,66E-14	,11E-10	,39E-12	,323E-10	7.965	7.965	3.90
,6282	1604.2	1624.4	,66E-14	,10E-10	,39E-12	,303E-10	7.953	7.953	3.98
,6382	1597.7	1619.9	,66E-14	,97E-11	,39E-12	,285E-10	7.940	7.939	4.06
,6482	1591.1	1615.0	,66E-14	,91E-11	,39E-12	,269E-10	7.926	7.925	4.14
,6582	1584.5	1609.9	,66E-14	,85E-11	,39E-12	,254E-10	7.911	7.910	4.22
,6682	1577.9	1604.5	,66E-14	,80E-11	,39E-12	,240E-10	7.895	7.894	4.30
,6782	1571.2	1598.9	,66E-14	,75E-11	,39E-12	,227E-10	7.879	7.878	4.38
,6882	1564.5	1593.2	,66E-14	,71E-11	,39E-12	,216E-10	7.862	7.861	4.46
,6982	1557.9	1587.4	,66E-14	,67E-11	,39E-12	,205E-10	7.845	7.844	4.53
,7082	1551.3	1581.4	,66E-14	,63E-11	,39E-12	,195E-10	7.828	7.827	4.61
,7182	1544.6	1575.4	,66E-14	,60E-11	,39E-12	,186E-10	7.810	7.809	4.69
,7282	1538.0	1569.3	,66E-14	,56E-11	,39E-12	,177E-10	7.792	7.791	4.77
,7382	1531.5	1563.2	,66E-14	,54E-11	,39E-12	,169E-10	7.774	7.773	4.85
,7482	1524.9	1557.1	,66E-14	,51E-11	,39E-12	,162E-10	7.756	7.755	4.92
,7582	1518.4	1550.9	,66E-14	,48E-11	,39E-12	,155E-10	7.738	7.737	5.00
,7682	1512.0	1544.8	,66E-14	,46E-11	,39E-12	,149E-10	7.720	7.719	5.08
,7782	1505.7	1538.6	,66E-14	,44E-11	,39E-12	,143E-10	7.702	7.701	5.16
,7882	1499.5	1532.5	,66E-14	,42E-11	,39E-12	,138E-10	7.684	7.684	5.23
,7982	1493.3	1526.4	,66E-14	,40E-11	,39E-12	,133E-10	7.666	7.666	5.31
,8082	1487.2	1520.4	,66E-14	,38E-11	,39E-12	,128E-10	7.649	7.648	5.39
,8182	1481.2	1514.3	,66E-14	,36E-11	,39E-12	,123E-10	7.631	7.630	5.46
,8282	1475.3	1508.4	,66E-14	,35E-11	,39E-12	,119E-10	7.614	7.613	5.54
,8382	1469.3	1502.5	,66E-14	,33E-11	,39E-12	,115E-10	7.596	7.596	5.62
,8482	1463.5	1496.6	,66E-14	,32E-11	,39E-12	,112E-10	7.579	7.579	5.69
,8582	1457.8	1490.8	,66E-14	,31E-11	,39E-12	,108E-10	7.562	7.562	5.77
,8682	1452.2	1485.1	,66E-14	,29E-11	,39E-12	,105E-10	7.545	7.545	5.84
,8782	1446.7	1479.4	,66E-14	,28E-11	,39E-12	,102E-10	7.529	7.528	5.92
,8882	1441.2	1473.8	,66E-14	,27E-11	,39E-12	,991E-11	7.512	7.512	5.998
ACABOU O OXIGENIO									
,8929	1438.7	1471.2	,66E-14	,27E-11	,39E-12	,978E-11	7.505	7.504	6.033

CONSTITUICAO DA PARTICULA FINAL:

CINZA - 76.5 % , VOLATEIS - 3.0 % , CARVAO - 20.5 %

O RENDIMENTO AO FIM DE 2.0 metros, SERA DE .507

A ENTRADA DE AR SECUNDARIO DEVE SER POSICIONADA A .32 metros DO INJECTOR

O RENDIMENTO DE .90 SERA OBTIDO AO FIM DE 3.65 metros

TEMPERATURA MASSIMA DA PARTICULA : 1655.7 DO AR: 1640.6

EXEMPLO DE CALCULO

QUAL O DIAMETRO DA PARTICULA ?(em micron) 35

QUAL A PERCENTAGEM DE AGUA ? 35

QUAL A PERCENTAGEM DE VOLATEIS ? 20

QUAL A PERCENTAGEM DE CINZA ? 5

QUAL O EXCESSO DE AR ?(em percentagem) 0

QUAL A TEMPERATURA INICIAL DA PARTICULA ?(C) 20

QUAL A TEMPERATURA DO AR PRIMARIO ?(C) 422

QUAL A TEMPERATURA DO AR SECUNDARIO ?(C) 422

QUAL O COMPRIMENTO DA CAMARA DE COMBUSTAO ?(m)

conhece a percentagem de H₂ e CH₄ nos volateis ?(S-sim) S

QUAL A PERCENTAGEM DE HIDROGENTO ? 15

QUAL A PERCENTAGEM DE METANO ? 55

DIAMETRO DO SLURRY - 35,0 microns

AGUA - 35,0 %

VOLATEIS - 20,0 %

CINZA - 5,0 %

CARVAO FIXO - 40,0 %

EXCESSO DE AR - .0 %

TEMP. DO AR SECUNDARIO - 700,0 K

-TEMPO--T. DA PART-T. DO AR---AGUA----CARVAO-VOLATEIS-OXIGENTO-VFI PART-VEL ESC-POS
 .0000 293,0 700,0 .87E-11 .99E-11 .50E-11 .584E-10 6,000 5,000 .00
 .0100 330,0 496,7 .25E-11 .99E-11 .50E-11 .584E-10 4,505 4,408 .05
 .0182 327,4 430,0 .13E-13 .99E-11 .50E-11 .584E-10 4,253 4,210 .08

O SLURRY JA SECOU

.0183 327,4 429,6 .72E-15 .99E-11 .50E-11 .584E-10 4,252 4,209 .08
 .0183 327,4 611,4 .72E-15 .99E-11 .50E-11 .584E-10 4,252 5,000 .08
 .0226 579,3 596,2 .72E-15 .99E-11 .50E-11 .584E-10 4,968 4,956 .10
 .0326 609,6 599,6 .72E-15 .99E-11 .50E-11 .583E-10 4,963 4,965 .15
 .0426 615,2 605,2 .72E-15 .99E-11 .50E-11 .582E-10 4,979 4,982 .20
 .0526 621,0 611,2 .72E-15 .99E-11 .49E-11 .582E-10 4,996 4,999 .25
 .0626 626,9 617,3 .72E-15 .99E-11 .49E-11 .581E-10 5,014 5,017 .30
 .0726 633,2 623,8 .72E-15 .99E-11 .49E-11 .580E-10 5,033 5,036 .35
 .0826 639,8 630,7 .72E-15 .99E-11 .49E-11 .578E-10 5,053 5,056 .40
 .0926 646,8 638,0 .72E-15 .99E-11 .49E-11 .577E-10 5,074 5,078 .45
 .1026 654,4 645,9 .72E-15 .99E-11 .48E-11 .575E-10 5,097 5,101 .50
 .1126 662,5 654,4 .72E-15 .99E-11 .48E-11 .573E-10 5,122 5,126 .54
 .1226 671,5 663,8 .72E-15 .99E-11 .48E-11 .571E-10 5,149 5,153 .61
 .1326 681,6 674,4 .72E-15 .99E-11 .47E-11 .568E-10 5,179 5,184 .64
 .1426 693,0 686,4 .72E-15 .99E-11 .47E-11 .565E-10 5,214 5,219 .71
 .1526 706,3 700,6 .72E-15 .99E-11 .46E-11 .560E-10 5,254 5,260 .76
 .1626 722,4 717,8 .72E-15 .99E-11 .45E-11 .555E-10 5,303 5,311 .82
 .1726 743,0 740,1 .72E-15 .99E-11 .44E-11 .547E-10 5,366 5,376 .87
 .1826 771,7 771,7 .72E-15 .99E-11 .42E-11 .535E-10 5,454 5,468 .92
 .1926 820,8 829,3 .72E-15 .99E-11 .39E-11 .513E-10 5,607 5,635 .98
 .1994 965,2 1146,0 .72E-15 .99E-11 .19E-11 .384E-10 6,078 6,549 1,02

ACABARAM OS VOLATEIS

.1997 1017,8 1426,7 .72E-15 .99E-11 .46E-13 .268E-10 6,307 7,379 1,02
 .2022 1401,2 1403,0 .72E-15 .99E-11 .46E-13 .267E-10 7,300 7,317 1,04
 .2122 1710,0 1516,8 .72E-15 .80E-11 .46E-13 .216E-10 7,613 7,644 1,11
 .2222 1837,0 1709,2 .72E-15 .51E-11 .46E-13 .138E-10 8,193 8,208 1,19
 .2322 1874,7 1815,5 .72E-15 .31E-11 .46E-13 .864E-11 8,517 8,522 1,27
 .2422 1877,5 1858,1 .72E-15 .20E-11 .46E-13 .560E-11 8,647 8,648 1,36
 .2522 1863,3 1866,1 .72E-15 .13E-11 .46E-13 .377E-11 8,672 8,672 1,45
 .2622 1841,0 1856,2 .72E-15 .89E-12 .46E-13 .263E-11 8,644 8,643 1,53
 .2722 1815,1 1837,0 .72E-15 .60E-12 .46E-13 .189E-11 8,588 8,587 1,62
 .2822 1787,5 1813,4 .72E-15 .41E-12 .46E-13 .140E-11 8,519 8,518 1,70

ACABOU O OXIGENTO

.2885 1770,3 1797,6 .72E-15 .33E-12 .46E-13 .117E-11 8,472 8,471 1,76

CONSTITUCAO DA PARTICULA FINAL:

CINZA - 74,9 % , VOLATEIS - 2,9 % , CARVAO - 20,2 %

O RENDIMENTO AO FIM DE 2,0 metros, SERA DE 1,000

A ENTRADA DE AR SECUNDARIO DEVE SER POSTICIONADA A .09 metros DO INJECTOR

O RENDIMENTO DE .90 SERA obtido AO FIM DE 1,38 metros

TEMPERATURA MASSIMA DA PARTICULA : 1879,1 DO AR: 1866,4

EXEMPLO DE CALCULO

QUAL O DIAMETRO DA PARTICULA ?(em microns) 150

QUAL A PERCENTAGEM DE AGUA DA PARTICULA ? 35

QUAL A PERCENTAGEM DE VOLATEIS ? 20

QUAL A PERCENTAGEM DE CINZA ? 5

QUAL A TEMPERATURA DA PARTICULA ?(C) 20

QUAL A TEMPERATURA DO AR PRIMARIO ?(C) 427

QUAL A TEMPERATURA DO AR SECUNDARIO ?(C) 427

conhece a percentagem de H₂ e CH₄ nos volateis ?(S-sim)

DIAMETRO DO SLURRY = 150.0 microns

AGUA = 35.0 %

VOLATEIS = 20.0 %

CTNZA = 5.0 %

CARVAO FIXO = 40.0 %

EXCESSO DE AR = .0 %

TEMP. DO AR SECUNDARIO = 700.0 K

-TEMPO-T.	JA	PART-T.	DO	AR	--AGUA--	CARVAO	VOLATEIS	OXIGENTO	VEL.	PART	VFL	FSC	POS
.0000	293.0	700.0	.69E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	6.000	5.000	.00				
.0100	323.7	676.4	.67E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	5.720	4.931	.05				
.0200	334.3	657.2	.63E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	5.506	4.875	.11				
.0300	336.0	640.6	.59E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	5.337	4.827	.16				
.0400	336.0	625.6	.55E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	5.203	4.783	.22				
.0500	335.8	611.9	.51E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	5.092	4.742	.27				
.0600	335.6	599.2	.47E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	5.001	4.705	.32				
.0700	335.3	587.4	.44E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.924	4.671	.37				
.0800	335.1	576.5	.41E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.858	4.639	.42				
.0900	334.9	566.3	.38E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.801	4.609	.47				
.1000	334.7	556.7	.35E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.751	4.581	.51				
.1100	334.5	547.7	.32E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.707	4.555	.56				
.1200	334.0	539.3	.30E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.667	4.530	.61				
.1300	333.1	531.3	.27E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.631	4.507	.65				
.1400	332.3	523.8	.25E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.598	4.484	.70				
.1500	331.5	516.6	.23E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.568	4.463	.75				
.1600	330.9	509.8	.21E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.541	4.443	.79				
.1700	330.4	503.3	.19E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.515	4.425	.84				
.1800	329.9	497.1	.17E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.491	4.406	.88				
.1900	329.5	491.2	.15E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.468	4.389	.93				
.2000	329.2	485.6	.13E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.447	4.373	.97				
.2100	328.9	480.3	.12E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.427	4.357	1.02				
.2200	328.7	475.1	.10E-09	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.408	4.342	1.06				
.2300	328.4	470.2	.87E-10	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.390	4.328	1.10				
.2400	328.3	465.5	.73E-10	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.374	4.314	1.15				
.2500	328.1	461.0	.59E-10	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.357	4.301	1.19				
.2600	327.9	456.7	.46E-10	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.342	4.288	1.23				
.2700	327.8	452.6	.34E-10	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.327	4.276	1.28				
.2800	327.7	448.6	.22E-10	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.313	4.264	1.32				
.2900	327.6	444.8	.11E-10	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.300	4.253	1.36				
.2981	327.5	441.9	.10E-11	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.290	4.245	1.40				
.2986	327.5	441.7	.13E-11	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.289	4.244	1.40				
.2987	327.5	441.7	.12E-11	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.289	4.244	1.40				
.2988	327.5	441.6	.11E-11	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.289	4.244	1.40				
.2989	327.5	441.6	.90E-12	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.289	4.244	1.40				
.2990	327.5	441.6	.87E-12	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.289	4.244	1.40				
.2991	327.5	441.5	.76E-12	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.289	4.244	1.40				
.2992	327.5	441.5	.65E-12	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.288	4.243	1.40				
.2993	327.5	441.5	.54E-12	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.288	4.243	1.40				
.2994	327.5	441.4	.43E-12	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.288	4.243	1.40				
.2995	327.5	441.4	.32E-12	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.288	4.243	1.40				
.2996	327.5	441.4	.22E-12	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.288	4.243	1.40				
.2997	327.5	441.3	.11E-12	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.288	4.243	1.40				
0 SLURRY	JA SFCOU												
.2997	327.5	441.3	.68E-13	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.288	4.243	1.41				
.2997	327.5	615.6	.68E-13	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.288	5.000	1.410				
.3060	389.9	612.7	.68E-13	.78E-09	.39E-09	.481E-08	5.035	4.992	1.443				
.3160	460.1	609.3	.68E-13	.78E-09	.39E-09	.481E-08	5.021	4.982	1.493				
.3260	509.0	607.0	.68E-13	.78E-09	.39E-09	.481E-08	5.008	4.975	1.542				
.3360	544.2	605.6	.68E-13	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.998	4.971	1.592				

.3460	569.9	605.1	.68E-13	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.990	4.969	1.64
.3560	589.0	605.4	.68E-13	.78E-09	.39E-09	.481E-08	4.984	4.970	1.69
.3660	603.6	606.3	.68E-13	.78E-09	.39E-09	.480E-08	4.980	4.973	1.74
.3760	614.9	607.9	.68E-13	.78E-09	.39E-09	.480E-08	4.979	4.978	1.79
.3860	623.9	610.1	.68E-13	.78E-09	.39E-09	.479E-08	4.979	4.984	1.84
.3960	631.3	612.8	.68E-13	.78E-09	.39E-09	.478E-08	4.982	4.992	1.89
.4060	637.6	616.0	.68E-13	.78E-09	.39E-09	.477E-08	4.986	5.001	1.94
.4160	643.0	619.6	.68E-13	.78E-09	.38E-09	.476E-08	4.992	5.012	1.99
.4260	647.9	623.6	.68E-13	.78E-09	.38E-09	.475E-08	4.999	5.023	2.04
.4360	652.5	628.0	.68E-13	.78E-09	.38E-09	.473E-08	5.008	5.036	2.09
.4460	657.0	632.8	.68E-13	.78E-09	.38E-09	.472E-08	5.018	5.050	2.14
.4560	661.5	638.0	.68E-13	.78E-09	.38E-09	.470E-08	5.030	5.065	2.19
.4660	666.1	643.6	.68E-13	.78E-09	.37E-09	.468E-08	5.043	5.082	2.24
.4760	670.9	649.7	.68E-13	.78E-09	.37E-09	.466E-08	5.057	5.100	2.29
.4860	675.9	656.3	.68E-13	.78E-09	.37E-09	.464E-08	5.072	5.119	2.34
.4960	681.3	663.6	.68E-13	.78E-09	.36E-09	.461E-08	5.089	5.140	2.39
.5060	687.0	671.5	.68E-13	.78E-09	.36E-09	.458E-08	5.108	5.164	2.44
.5160	693.3	680.3	.68E-13	.78E-09	.35E-09	.455E-08	5.129	5.189	2.49
.5260	700.1	690.2	.68E-13	.78E-09	.35E-09	.452E-08	5.152	5.218	2.54
.5360	707.7	701.2	.68E-13	.78E-09	.34E-09	.448E-08	5.177	5.250	2.59
.5460	716.2	713.9	.68E-13	.78E-09	.34E-09	.443E-08	5.206	5.287	2.65
.5560	725.8	728.5	.68E-13	.78E-09	.33E-09	.438E-08	5.238	5.330	2.70
.5660	736.9	745.9	.68E-13	.78E-09	.32E-09	.431E-08	5.276	5.381	2.75
.5760	749.9	766.9	.68E-13	.78E-09	.31E-09	.423E-08	5.320	5.442	2.80
.5860	765.5	793.3	.68E-13	.78E-09	.29E-09	.413E-08	5.373	5.519	2.86
.5960	785.2	828.5	.68E-13	.78E-09	.27E-09	.399E-08	5.439	5.622	2.91
.6060	811.5	880.4	.68E-13	.78E-09	.24E-09	.379E-08	5.528	5.773	2.97
.6160	852.4	980.3	.68E-13	.78E-09	.19E-09	.340E-08	5.663	6.063	3.02
.6215	894.7	1132.7	.68E-13	.78E-09	.10E-09	.279E-08	5.791	6.499	3.058
.6226	907.5	1195.0	.68E-13	.78E-09	.65E-10	.254E-08	5.827	6.693	3.064
.6228	911.0	1213.5	.68E-13	.78E-09	.54E-10	.247E-08	5.835	6.750	3.064
.6229	912.6	1222.2	.68E-13	.78E-09	.49E-10	.243E-08	5.838	6.775	3.064
.6230	914.2	1231.3	.68E-13	.78E-09	.44E-10	.239E-08	5.842	6.802	3.067
.6231	915.9	1240.8	.68E-13	.78E-09	.38E-10	.235E-08	5.845	6.829	3.067
.6232	917.6	1250.9	.68E-13	.78E-09	.32E-10	.231E-08	5.849	6.859	3.068
.6233	919.4	1261.5	.68E-13	.78E-09	.26E-10	.227E-08	5.852	6.890	3.069
.6234	921.3	1272.7	.68E-13	.78E-09	.20E-10	.222E-08	5.855	6.923	3.069
.6235	923.2	1284.6	.68E-13	.78E-09	.13E-10	.218E-08	5.858	6.958	3.070
.6236	925.3	1297.3	.68E-13	.78E-09	.52E-11	.212E-08	5.860	6.995	3.070

ACABARAM OS VOLATEIS

.6236	925.6	1299.4	.68E-13	.78E-09	.39E-11	.212E-08	5.861	7.001	3.070
.7076	1335.0	1281.6	.68E-13	.76E-09	.39E-11	.206E-08	6.942	6.949	3.634
.8067	1476.5	1328.3	.68E-13	.68E-09	.39E-11	.184E-08	7.061	7.084	4.329
.8338	1508.6	1349.3	.68E-13	.65E-09	.39E-11	.176E-08	7.122	7.147	4.521
.8438	1518.2	1357.9	.68E-13	.64E-09	.39E-11	.172E-08	7.146	7.172	4.592
.8538	1526.4	1366.7	.68E-13	.62E-09	.39E-11	.169E-08	7.172	7.198	4.664
.8638	1532.4	1375.4	.68E-13	.61E-09	.39E-11	.165E-08	7.198	7.223	4.736
.8738	1537.6	1384.0	.68E-13	.60E-09	.39E-11	.162E-08	7.224	7.249	4.808
.8838	1542.0	1392.5	.68E-13	.58E-09	.39E-11	.158E-08	7.249	7.273	4.880
.8938	1545.8	1400.7	.68E-13	.57E-09	.39E-11	.155E-08	7.275	7.298	4.953
.9038	1549.0	1408.7	.68E-13	.56E-09	.39E-11	.151E-08	7.299	7.321	5.026
.9138	1551.8	1416.4	.68E-13	.55E-09	.39E-11	.149E-08	7.323	7.344	5.099
.9238	1554.1	1423.9	.68E-13	.53E-09	.39E-11	.145E-08	7.346	7.365	5.172
.9338	1556.1	1431.0	.68E-13	.52E-09	.39E-11	.142E-08	7.368	7.386	5.246
.9438	1557.8	1432.9	.68E-13	.51E-09	.39E-11	.139E-08	7.389	7.406	5.319
.9538	1559.2	1444.5	.68E-13	.50E-09	.39E-11	.136E-08	7.410	7.426	5.393
.9638	1560.4	1450.7	.68E-13	.49E-09	.39E-11	.133E-08	7.429	7.444	5.468
.9738	1561.3	1456.7	.68E-13	.48E-09	.39E-11	.130E-08	7.447	7.461	5.542
.9838	1562.1	1462.4	.68E-13	.47E-09	.39E-11	.127E-08	7.465	7.478	5.617
.9938	1562.7	1467.8	.68E-13	.46E-09	.39E-11	.124E-08	7.482	7.494	5.691

1.0038	1563.1	1472.9	.68E-13	.45E-09	.39E-11	.122E-08	7.498	7.509	5.766
1.0138	1563.9	1477.7	.68E-13	.44E-09	.39E-11	.119E-08	7.513	7.523	5.84
1.0238	1564.3	1482.4	.68E-13	.43E-09	.39E-11	.117E-08	7.527	7.537	5.916
1.0338	1564.4	1486.8	.68E-13	.42E-09	.39E-11	.114E-08	7.540	7.549	5.99
1.0438	1564.3	1490.9	.68E-13	.41E-09	.39E-11	.112E-08	7.553	7.562	6.061
1.0538	1564.0	1494.8	.68E-13	.40E-09	.39E-11	.110E-08	7.565	7.573	6.143
1.0638	1563.7	1498.4	.68E-13	.39E-09	.39E-11	.107E-08	7.577	7.584	6.219
1.0738	1563.2	1501.9	.68E-13	.38E-09	.39E-11	.105E-08	7.587	7.594	6.294
1.0838	1562.6	1505.1	.68E-13	.38E-09	.39E-11	.103E-08	7.597	7.603	6.370
1.0938	1561.9	1508.1	.68E-13	.37E-09	.39E-11	.101E-08	7.606	7.612	6.446
1.1038	1561.2	1510.8	.68E-13	.36E-09	.39E-11	.990E-09	7.615	7.620	6.527
1.1138	1560.4	1513.4	.68E-13	.35E-09	.39E-11	.970E-09	7.623	7.628	6.599
1.1238	1559.5	1515.8	.68E-13	.35E-09	.39E-11	.951E-09	7.630	7.635	6.675
1.1338	1558.5	1518.1	.68E-13	.34E-09	.39E-11	.933E-09	7.637	7.641	6.751
1.1438	1557.4	1520.1	.68E-13	.33E-09	.39E-11	.915E-09	7.644	7.647	6.826
1.1538	1556.3	1522.0	.68E-13	.33E-09	.39E-11	.898E-09	7.649	7.653	6.904
1.1638	1555.1	1523.7	.68E-13	.32E-09	.39E-11	.881E-09	7.655	7.658	6.981
1.1738	1553.9	1525.3	.68E-13	.31E-09	.39E-11	.864E-09	7.660	7.662	7.057
1.1838	1552.6	1526.7	.68E-13	.31E-09	.39E-11	.848E-09	7.664	7.666	7.134
1.1938	1551.3	1528.0	.68E-13	.30E-09	.39E-11	.833E-09	7.668	7.670	7.210
1.2038	1549.9	1529.1	.68E-13	.30E-09	.39E-11	.818E-09	7.672	7.673	7.287
1.2138	1548.5	1530.1	.68E-13	.29E-09	.39E-11	.803E-09	7.675	7.676	7.364
1.2238	1547.0	1531.0	.68E-13	.29E-09	.39E-11	.789E-09	7.678	7.679	7.441
1.2338	1545.5	1531.7	.68E-13	.28E-09	.39E-11	.775E-09	7.680	7.681	7.517
1.2438	1543.5	1532.3	.68E-13	.28E-09	.39E-11	.761E-09	7.682	7.683	7.594
1.2538	1541.8	1532.8	.68E-13	.27E-09	.39E-11	.748E-09	7.684	7.684	7.671
1.2638	1540.1	1533.2	.68E-13	.27E-09	.39E-11	.735E-09	7.685	7.686	7.748
1.2738	1538.4	1533.5	.68E-13	.26E-09	.39E-11	.723E-09	7.686	7.686	7.825
1.2838	1536.7	1533.7	.68E-13	.26E-09	.39E-11	.711E-09	7.687	7.687	7.902
1.2938	1534.9	1533.8	.68E-13	.25E-09	.39E-11	.699E-09	7.687	7.687	7.979
1.3038	1533.1	1533.8	.68E-13	.25E-09	.39E-11	.688E-09	7.687	7.687	8.055
1.3138	1531.4	1533.8	.68E-13	.24E-09	.39E-11	.677E-09	7.687	7.687	8.132
1.3238	1529.6	1533.6	.68E-13	.24E-09	.39E-11	.666E-09	7.687	7.687	8.209
1.3338	1527.8	1533.4	.68E-13	.24E-09	.39E-11	.655E-09	7.686	7.686	8.286
1.3438	1526.0	1533.1	.68E-13	.23E-09	.39E-11	.645E-09	7.685	7.685	8.363
1.3538	1524.1	1532.7	.68E-13	.23E-09	.39E-11	.635E-09	7.684	7.684	8.440
1.3638	1522.3	1532.2	.68E-13	.22E-09	.39E-11	.625E-09	7.683	7.683	8.517
1.3738	1520.4	1531.7	.68E-13	.22E-09	.39E-11	.615E-09	7.682	7.681	8.593
1.3838	1518.5	1531.2	.68E-13	.22E-09	.39E-11	.606E-09	7.680	7.680	8.670
1.3938	1516.6	1530.5	.68E-13	.21E-09	.39E-11	.597E-09	7.678	7.678	8.747
1.4038	1514.7	1529.8	.68E-13	.21E-09	.39E-11	.588E-09	7.676	7.676	8.824
1.4138	1512.7	1529.1	.68E-13	.21E-09	.39E-11	.579E-09	7.674	7.673	8.901
1.4238	1511.1	1528.3	.68E-13	.20E-09	.39E-11	.571E-09	7.672	7.671	8.977
1.4338	1509.2	1527.5	.68E-13	.20E-09	.39E-11	.563E-09	7.670	7.669	9.054
1.4438	1507.2	1526.6	.68E-13	.20E-09	.39E-11	.555E-09	7.667	7.666	9.131
1.4538	1505.3	1525.7	.68E-13	.19E-09	.39E-11	.547E-09	7.664	7.663	9.207
1.4638	1503.3	1524.7	.68E-13	.19E-09	.39E-11	.539E-09	7.662	7.661	9.284
1.4738	1501.3	1523.7	.68E-13	.19E-09	.39E-11	.531E-09	7.659	7.658	9.361
1.4838	1499.3	1522.6	.68E-13	.19E-09	.39E-11	.524E-09	7.656	7.655	9.437
1.4938	1497.3	1521.5	.68E-13	.18E-09	.39E-11	.517E-09	7.653	7.651	9.514
1.5038	1495.3	1520.4	.68E-13	.18E-09	.39E-11	.510E-09	7.649	7.648	9.590
1.5138	1493.3	1519.2	.68E-13	.18E-09	.39E-11	.503E-09	7.646	7.645	9.667
1.5238	1491.3	1518.0	.68E-13	.18E-09	.39E-11	.496E-09	7.642	7.641	9.743
1.5338	1489.3	1516.8	.68E-13	.17E-09	.39E-11	.490E-09	7.639	7.637	9.820
1.5438	1487.3	1515.5	.68E-13	.17E-09	.39E-11	.483E-09	7.635	7.634	9.896
1.5538	1485.2	1514.2	.68E-13	.17E-09	.39E-11	.477E-09	7.631	7.630	9.972
1.5638	1483.2	1512.9	.68E-13	.17E-09	.39E-11	.471E-09	7.627	7.626	10.049
1.5738	1481.2	1511.4	.68E-13	.16E-09	.39E-11	.465E-09	7.624	7.622	10.125
1.5838	1479.2	1510.2	.68E-13	.16E-09	.39E-11	.459E-09	7.620	7.618	10.201
1.5938	1476.9	1508.8	.68E-13	.16E-09	.39E-11	.454E-09	7.615	7.614	10.277

1.6038	1474.8	1507.4	.68E-13	.16E-09	.39E-11	.448E-09	7.611	7.61010.353
1.6138	1472.8	1505.9	.68E-13	.16E-09	.39E-11	.443E-09	7.607	7.60610.429
1.6238	1470.8	1504.4	.68E-13	.15E-09	.39E-11	.437E-09	7.603	7.60110.505
1.6338	1468.7	1503.0	.68E-13	.15E-09	.39E-11	.432E-09	7.598	7.59710.581
1.6438	1466.7	1501.5	.68E-13	.15E-09	.39E-11	.427E-09	7.594	7.59310.657
1.6538	1464.7	1499.9	.68E-13	.15E-09	.39E-11	.422E-09	7.590	7.58810.733
1.6638	1462.6	1498.4	.68E-13	.15E-09	.39E-11	.417E-09	7.585	7.58410.809
1.6738	1460.6	1496.8	.68E-13	.14E-09	.39E-11	.413E-09	7.581	7.57910.885
1.6838	1458.6	1495.3	.68E-13	.14E-09	.39E-11	.408E-09	7.576	7.57410.961
1.6938	1456.6	1493.7	.68E-13	.14E-09	.39E-11	.404E-09	7.571	7.57011.037
1.7038	1454.6	1492.1	.68E-13	.14E-09	.39E-11	.399E-09	7.567	7.56511.112
1.7138	1452.5	1490.5	.68E-13	.14E-09	.39E-11	.395E-09	7.562	7.56011.188
1.7238	1450.5	1488.8	.68E-13	.14E-09	.39E-11	.390E-09	7.557	7.55611.263
1.7338	1448.6	1487.2	.68E-13	.13E-09	.39E-11	.386E-09	7.552	7.55111.339
1.7438	1446.7	1485.6	.68E-13	.13E-09	.39E-11	.382E-09	7.548	7.54611.415
1.7538	1444.7	1483.9	.68E-13	.13E-09	.39E-11	.378E-09	7.543	7.54111.490
1.7638	1442.7	1482.3	.68E-13	.13E-09	.39E-11	.374E-09	7.538	7.53711.565
1.7738	1440.8	1480.6	.68E-13	.13E-09	.39E-11	.370E-09	7.533	7.53211.641
1.7838	1438.8	1478.9	.68E-13	.13E-09	.39E-11	.367E-09	7.528	7.52211.716
1.7938	1436.8	1477.3	.68E-13	.13E-09	.39E-11	.363E-09	7.523	7.52211.791
1.8038	1434.9	1475.6	.68E-13	.12E-09	.39E-11	.359E-09	7.518	7.51711.867
1.8138	1432.9	1473.9	.68E-13	.12E-09	.39E-11	.356E-09	7.513	7.51211.942
1.8238	1431.0	1472.2	.68E-13	.12E-09	.39E-11	.352E-09	7.508	7.50212.017
1.8338	1429.0	1470.5	.68E-13	.12E-09	.39E-11	.349E-09	7.503	7.50212.092
1.8438	1427.1	1468.8	.68E-13	.12E-09	.39E-11	.346E-09	7.499	7.49712.167
1.8538	1425.1	1467.1	.68E-13	.12E-09	.39E-11	.342E-09	7.494	7.49212.242
1.8638	1423.2	1465.4	.68E-13	.12E-09	.39E-11	.339E-09	7.489	7.48712.317
1.8738	1421.3	1463.7	.68E-13	.12E-09	.39E-11	.336E-09	7.483	7.48212.392
1.8838	1419.3	1461.9	.68E-13	.11E-09	.39E-11	.333E-09	7.478	7.47712.466
1.8938	1417.3	1460.2	.68E-13	.11E-09	.39E-11	.330E-09	7.473	7.47212.541
1.9038	1415.4	1458.5	.68E-13	.11E-09	.39E-11	.327E-09	7.468	7.46712.616
1.9138	1413.5	1456.8	.68E-13	.11E-09	.39E-11	.324E-09	7.463	7.46212.691
1.9238	1411.7	1455.0	.68E-13	.11E-09	.39E-11	.321E-09	7.458	7.45712.765
1.9338	1409.8	1453.3	.68E-13	.11E-09	.39E-11	.319E-09	7.453	7.45212.840
1.9438	1407.9	1451.6	.68E-13	.11E-09	.39E-11	.316E-09	7.448	7.44712.914
1.9538	1406.0	1449.8	.68E-13	.11E-09	.39E-11	.313E-09	7.443	7.44212.989
1.9638	1404.2	1448.1	.68E-13	.11E-09	.39E-11	.311E-09	7.438	7.43713.063
1.9738	1402.3	1446.4	.68E-13	.11E-09	.39E-11	.308E-09	7.433	7.43113.137
1.9838	1400.5	1444.6	.68E-13	.10E-09	.39E-11	.306E-09	7.428	7.42613.212
1.9938	1398.7	1442.9	.68E-13	.10E-09	.39E-11	.303E-09	7.423	7.42113.286
2.0038	1396.9	1441.2	.68E-13	.10E-09	.39E-11	.301E-09	7.418	7.41613.360
2.0138	1395.1	1439.5	.68E-13	.10E-09	.39E-11	.298E-09	7.413	7.41113.434
2.0238	1393.3	1437.7	.68E-13	.10E-09	.39E-11	.296E-09	7.408	7.40613.508
2.0338	1391.5	1436.0	.68E-13	.10E-09	.39E-11	.294E-09	7.403	7.40113.582
2.0438	1389.7	1434.3	.68E-13	.99E-10	.39E-11	.292E-09	7.397	7.39613.656
2.0538	1387.9	1432.6	.68E-13	.98E-10	.39E-11	.289E-09	7.392	7.39113.730
2.0638	1386.2	1430.9	.68E-13	.97E-10	.39E-11	.287E-09	7.387	7.38613.804
2.0738	1384.4	1429.2	.68E-13	.97E-10	.39E-11	.285E-09	7.382	7.38113.878
2.0838	1382.7	1427.5	.68E-13	.96E-10	.39E-11	.283E-09	7.377	7.37613.952
2.0938	1380.9	1425.7	.68E-13	.95E-10	.39E-11	.281E-09	7.372	7.37114.026
2.1038	1379.2	1424.0	.68E-13	.94E-10	.39E-11	.279E-09	7.367	7.36614.099
2.1138	1377.4	1422.3	.68E-13	.94E-10	.39E-11	.277E-09	7.362	7.36114.173
2.1238	1375.6	1420.6	.68E-13	.93E-10	.39E-11	.275E-09	7.357	7.35614.247
2.1338	1373.9	1419.0	.68E-13	.92E-10	.39E-11	.273E-09	7.352	7.35114.320
2.1438	1372.2	1417.3	.68E-13	.91E-10	.39E-11	.271E-09	7.348	7.34614.394
2.1538	1370.5	1415.6	.68E-13	.91E-10	.39E-11	.269E-09	7.343	7.34114.467
2.1638	1368.8	1413.9	.68E-13	.90E-10	.39E-11	.268E-09	7.338	7.33614.541
2.1738	1367.1	1412.2	.68E-13	.89E-10	.39E-11	.266E-09	7.333	7.33114.614
2.1838	1365.4	1410.5	.68E-13	.89E-10	.39E-11	.264E-09	7.328	7.32714.687
2.1938	1363.8	1408.9	.68E-13	.88E-10	.39E-11	.262E-09	7.323	7.32214.760

2.2038	1362.1	1407.2	.68E-13	.88E-10	.39E-11	.261E-09	7.318	7.31714.83
2.2138	1360.4	1405.5	.68E-13	.87E-10	.39E-11	.259E-09	7.313	7.31214.90
2.2238	1358.8	1403.9	.68E-13	.86E-10	.39E-11	.257E-09	7.308	7.30714.98
2.2338	1357.2	1402.2	.68E-13	.86E-10	.39E-11	.256E-09	7.303	7.30215.05
2.2438	1355.6	1400.6	.68E-13	.85E-10	.39E-11	.254E-09	7.299	7.29715.12
2.2538	1354.0	1398.9	.68E-13	.85E-10	.39E-11	.253E-09	7.294	7.29315.19
2.2638	1352.4	1397.3	.68E-13	.84E-10	.39E-11	.251E-09	7.289	7.28815.27
2.2738	1350.8	1395.7	.68E-13	.83E-10	.39E-11	.250E-09	7.284	7.28315.34
2.2838	1349.2	1394.0	.68E-13	.83E-10	.39E-11	.248E-09	7.279	7.27815.41
2.2938	1347.6	1392.4	.68E-13	.82E-10	.39E-11	.247E-09	7.275	7.27415.49
2.3038	1346.0	1390.8	.68E-13	.82E-10	.39E-11	.245E-09	7.270	7.26915.56
2.3138	1344.5	1389.2	.68E-13	.81E-10	.39E-11	.244E-09	7.265	7.26415.63
2.3238	1342.9	1387.6	.68E-13	.81E-10	.39E-11	.243E-09	7.261	7.25915.70
2.3338	1341.4	1386.0	.68E-13	.80E-10	.39E-11	.241E-09	7.256	7.25515.78
2.3438	1339.8	1384.4	.68E-13	.80E-10	.39E-11	.240E-09	7.251	7.25015.85
2.3538	1338.2	1382.8	.68E-13	.79E-10	.39E-11	.239E-09	7.247	7.24515.92
2.3638	1336.7	1381.2	.68E-13	.79E-10	.39E-11	.237E-09	7.242	7.24115.99
2.3738	1335.2	1379.6	.68E-13	.78E-10	.39E-11	.236E-09	7.237	7.23616.07
2.3838	1333.7	1378.1	.68E-13	.78E-10	.39E-11	.235E-09	7.233	7.23216.14
2.3938	1332.1	1376.5	.68E-13	.77E-10	.39E-11	.234E-09	7.228	7.22716.21
2.4038	1330.7	1374.9	.68E-13	.77E-10	.39E-11	.232E-09	7.223	7.22216.28
2.4138	1329.2	1373.4	.68E-13	.77E-10	.39E-11	.231E-09	7.219	7.21816.35
2.4238	1327.7	1371.8	.68E-13	.76E-10	.39E-11	.230E-09	7.214	7.21316.42
2.4338	1326.2	1370.3	.68E-13	.76E-10	.39E-11	.229E-09	7.210	7.20916.50
2.4438	1324.8	1368.7	.68E-13	.75E-10	.39E-11	.228E-09	7.205	7.20416.57
2.4538	1323.3	1367.2	.68E-13	.75E-10	.39E-11	.227E-09	7.201	7.20016.64
2.4638	1321.9	1365.7	.68E-13	.74E-10	.39E-11	.226E-09	7.196	7.19516.71
2.4738	1320.5	1364.2	.68E-13	.74E-10	.39E-11	.225E-09	7.192	7.19116.78
2.4838	1319.0	1362.7	.68E-13	.74E-10	.39E-11	.224E-09	7.187	7.18616.85
2.4938	1317.6	1361.1	.68E-13	.73E-10	.39E-11	.222E-09	7.183	7.18216.93
2.5038	1316.2	1359.6	.68E-13	.73E-10	.39E-11	.221E-09	7.179	7.17817.00
2.5138	1314.8	1358.1	.68E-13	.72E-10	.39E-11	.220E-09	7.174	7.17317.07
2.5238	1313.4	1356.7	.68E-13	.72E-10	.39E-11	.219E-09	7.170	7.16917.14
2.5338	1311.9	1355.2	.68E-13	.72E-10	.39E-11	.218E-09	7.166	7.16517.21
2.5438	1310.5	1353.7	.68E-13	.71E-10	.39E-11	.218E-09	7.161	7.16017.28
2.5538	1309.2	1352.2	.68E-13	.71E-10	.39E-11	.217E-09	7.157	7.15617.36
2.5638	1307.8	1350.8	.68E-13	.71E-10	.39E-11	.216E-09	7.153	7.15217.43
2.5738	1306.4	1349.3	.68E-13	.70E-10	.39E-11	.215E-09	7.148	7.14717.50
2.5838	1305.1	1347.8	.68E-13	.70E-10	.39E-11	.214E-09	7.144	7.14317.57
2.5938	1303.7	1346.4	.68E-13	.70E-10	.39E-11	.213E-09	7.140	7.13917.64
2.6038	1302.4	1344.9	.68E-13	.69E-10	.39E-11	.212E-09	7.136	7.13517.72
2.6138	1301.0	1343.5	.68E-13	.69E-10	.39E-11	.211E-09	7.131	7.13017.79
2.6238	1299.7	1342.1	.68E-13	.69E-10	.39E-11	.210E-09	7.127	7.12617.86
2.6338	1298.4	1340.7	.68E-13	.68E-10	.39E-11	.210E-09	7.123	7.12217.93
2.6438	1297.1	1339.2	.68E-13	.68E-10	.39E-11	.209E-09	7.119	7.11818.00
2.6538	1295.8	1337.8	.68E-13	.68E-10	.39E-11	.208E-09	7.115	7.11418.07
2.6638	1294.5	1336.4	.68E-13	.67E-10	.39E-11	.207E-09	7.111	7.11018.15
2.6738	1293.2	1335.0	.68E-13	.67E-10	.39E-11	.206E-09	7.106	7.10618.22
2.6838	1291.9	1333.6	.68E-13	.67E-10	.39E-11	.205E-09	7.102	7.10118.29
2.6938	1290.6	1332.2	.68E-13	.67E-10	.39E-11	.205E-09	7.098	7.09718.36
2.7038	1289.4	1330.9	.68E-13	.66E-10	.39E-11	.204E-09	7.094	7.09318.43
2.7138	1288.1	1329.5	.68E-13	.66E-10	.39E-11	.203E-09	7.090	7.08918.50
2.7238	1286.8	1328.1	.68E-13	.66E-10	.39E-11	.202E-09	7.086	7.08518.57
2.7338	1285.5	1326.7	.68E-13	.65E-10	.39E-11	.202E-09	7.082	7.08118.64
2.7438	1284.3	1325.4	.68E-13	.65E-10	.39E-11	.201E-09	7.078	7.07718.71
2.7538	1283.1	1324.0	.68E-13	.65E-10	.39E-11	.200E-09	7.074	7.07318.78
2.7638	1281.8	1322.7	.68E-13	.65E-10	.39E-11	.200E-09	7.070	7.06918.85
2.7738	1280.6	1321.3	.68E-13	.64E-10	.39E-11	.199E-09	7.066	7.06518.92
2.7838	1279.4	1320.0	.68E-13	.64E-10	.39E-11	.198E-09	7.063	7.06218.99
2.7938	1278.2	1318.7	.68E-13	.64E-10	.39E-11	.198E-09	7.059	7.05819.06

2.8038	1277.0	1317.4	.68E-13	.64E-10	.39E-11	.197E-09	7.055	7.05419.138
2.8138	1275.8	1316.0	.68E-13	.63E-10	.39E-11	.196E-09	7.051	7.05019.208
2.8238	1274.6	1314.7	.68E-13	.63E-10	.39E-11	.196E-09	7.047	7.04619.279
2.8338	1273.4	1313.4	.68E-13	.63E-10	.39E-11	.195E-09	7.043	7.04219.349
2.8438	1272.2	1312.1	.68E-13	.62E-10	.39E-11	.194E-09	7.039	7.03919.419
2.8538	1271.0	1310.8	.68E-13	.62E-10	.39E-11	.194E-09	7.036	7.03519.489
2.8638	1269.9	1309.5	.68E-13	.62E-10	.39E-11	.193E-09	7.032	7.03119.559
2.8738	1268.7	1308.3	.68E-13	.62E-10	.39E-11	.193E-09	7.028	7.02719.630
2.8838	1267.5	1307.0	.68E-13	.62E-10	.39E-11	.192E-09	7.024	7.02319.700
2.8938	1266.4	1305.7	.68E-13	.62E-10	.39E-11	.191E-09	7.021	7.02019.770
2.9038	1265.2	1304.4	.68E-13	.61E-10	.39E-11	.191E-09	7.017	7.01619.840
2.9138	1264.1	1303.2	.68E-13	.61E-10	.39E-11	.190E-09	7.013	7.01219.910
2.9238	1263.0	1301.9	.68E-13	.61E-10	.39E-11	.190E-09	7.010	7.00919.981
2.9338	1261.8	1300.7	.68E-13	.61E-10	.39E-11	.189E-09	7.006	7.00520.051
2.9825	1256.3	1294.6	.68E-13	.60E-10	.39E-11	.187E-09	6.988	6.98720.392
3.0816	1245.8	1282.8	.68E-13	.58E-10	.39E-11	.182E-09	6.954	6.95321.082
3.1807	1235.7	1271.5	.68E-13	.56E-10	.39E-11	.177E-09	6.921	6.92021.770
3.2798	1226.2	1260.7	.68E-13	.55E-10	.39E-11	.174E-09	6.889	6.88822.454
3.3789	1217.1	1250.5	.68E-13	.54E-10	.39E-11	.170E-09	6.859	6.85823.135
3.4780	1208.4	1240.6	.68E-13	.53E-10	.39E-11	.167E-09	6.830	6.83023.814
3.5771	1200.2	1231.2	.68E-13	.52E-10	.39E-11	.165E-09	6.803	6.80224.489
3.6762	1192.3	1222.3	.68E-13	.51E-10	.39E-11	.162E-09	6.776	6.77625.162
3.7753	1184.9	1213.7	.68E-13	.50E-10	.39E-11	.160E-09	6.751	6.75125.832
3.8744	1177.7	1205.5	.68E-13	.49E-10	.39E-11	.158E-09	6.727	6.72726.500
3.9735	1170.9	1197.6	.68E-13	.48E-10	.39E-11	.156E-09	6.704	6.70427.165
4.0726	1164.4	1190.1	.68E-13	.48E-10	.39E-11	.154E-09	6.682	6.68227.829
4.1717	1158.2	1182.9	.68E-13	.47E-10	.39E-11	.153E-09	6.661	6.66128.490
4.2708	1152.2	1176.1	.68E-13	.47E-10	.39E-11	.152E-09	6.641	6.64129.149
4.3699	1146.5	1169.5	.68E-13	.46E-10	.39E-11	.150E-09	6.622	6.62129.806
4.4690	1141.1	1163.2	.68E-13	.46E-10	.39E-11	.149E-09	6.603	6.60330.461
4.5681	1135.8	1157.1	.68E-13	.45E-10	.39E-11	.148E-09	6.585	6.58531.115
4.6672	1130.8	1151.3	.68E-13	.45E-10	.39E-11	.147E-09	6.568	6.56831.767
4.7663	1126.0	1145.8	.68E-13	.44E-10	.39E-11	.146E-09	6.552	6.55232.417
4.8654	1121.5	1140.5	.68E-13	.44E-10	.39E-11	.145E-09	6.537	6.53633.065
4.9645	1117.1	1135.4	.68E-13	.44E-10	.39E-11	.144E-09	6.522	6.52133.712
5.0636	1112.8	1130.5	.68E-13	.44E-10	.39E-11	.143E-09	6.507	6.50734.358
5.1627	1108.8	1125.8	.68E-13	.43E-10	.39E-11	.143E-09	6.493	6.49335.002
5.2618	1104.9	1121.2	.68E-13	.43E-10	.39E-11	.142E-09	6.480	6.48035.645
5.3609	1101.1	1116.9	.68E-13	.43E-10	.39E-11	.141E-09	6.468	6.46736.286
5.4600	1097.6	1112.7	.68E-13	.42E-10	.39E-11	.141E-09	6.455	6.45536.927
5.5591	1094.1	1108.7	.68E-13	.42E-10	.39E-11	.140E-09	6.444	6.44337.566



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000027652