

2299862

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE FORMATURA

7,5 (sete e mais)  
Pr. → . 7. ~

QUEIMADOR CICLÔNICO PARA CARVÃO PULVERIZADO

VOLUME I

Autor : RUY FERNANDES TORRES

Orientador: EURYALE J. ZERBINI

1981

SUMÁRIO

Este trabalho foi elaborado com a finalidade de apresentar os tópicos mais importantes a serem abordados no projeto de um Queimador Ciclônico para a utilização de carvão mineral nacional, em substituição às fontes de energia combustíveis provenientes do petróleo.

Sua elaboração já se justifica nos dias atuais, em função dos altos custos do petróleo no mercado mundial, quanto mais no tocante à independência e autonomia energética brasileira, já que possuímos amplas reservas deste mineral.

Com o objetivo de simplificar ao leitor, este foi dividido em duas partes distintas, sendo a primeira uma abordagem completa dos fundamentos envolvidos no cálculo e no dimensionamento e a segunda uma aplicação prática com números reais, realizados para a implantação da CERÂMICA IRAPUÁ - LTDA., situada no município de TATUI, São Paulo.

Neste volume pode ser encontrado o desenvolvimento teórico inerente ao projeto desde o início até o item 2.5. de Pré-aquecimento do ar.

A complementação deste trabalho é encontrada no volume II de mesmo título, apresentado como Trabalho de Formatura do mesmo ano, de autoria de Silval Olivetti.

11

ÍNDICE

<u>ITEM</u>	<u>ASSUNTO</u>	<u>PAG.</u>
1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1	ASPECTOS QUÍMICOS	7
2.1.1	Generalidades	7
2.1.2	Combustão do Carvão	7
2.1.3	Estequiometria da Combustão	12
2.1.3.1	Ar necessário à Combustão	13
2.1.3.2	Volume dos gases produzidos na combustão	16
2.1.3.3	Temperatura Adiabática da chama	17
2.2	ASPECTOS FÍSICOS	21
2.2.1	Temperatura de ignição do Combustível Sólido	21
2.2.2	Combustão nos jatos de carvão pulverizado	23
2.2.2.1	Combustão à baixa temperatura	25
2.2.2.2	Combustão à média temperatura	26
2.2.2.3	Combustão a altas temperaturas e com partí- culas de pequenos diâmetros	27
2.2.3	Papel desempenhado pelas Matérias Voláteis na Combustão do Carvão Pulverizado	29
2.2.4	Irradiação das chamas luminosas	29
2.3	PERDAS E RENDIMENTOS DA COMBUSTÃO	34
2.3.1	Generalidades	34
2.3.2	Perdas	34
2.3.2.1	Perdas por Combustível não queimado	34
2.3.2.2	Perdas por Irradiação, Condução e Convecção	36
2.3.2.3	Perdas por Entalpia dos Gases na chaminé e no queimador	37
2.3.3	Rendimento da Combustão	39
2.4	FORMA DE DIMENSÕES DA CHAMA	39
2.5	PRE-AQUECIMENTO DO AR	41
2.6	ISOLAMENTO TÉRMICO DO QUEIMADOR	42

2.7	PREPARAÇÃO DO CARVÃO	44
2.7.1	Moinhos de Carvão em pó	46
2.7.1.1	Moinhos de Bolas	47
2.7.1.2	Moinhos de Martelos	48
2.7.1.3	Moinho H.S.	49
2.7.1.4	Moinho K.S.G.	50
2.7.1.5	Moinho de Molas	51
2.7.1.6	Moinhos Centrífugos	51
2.7.1.7	Moinhos de Choque	51
3	APLICAÇÃO PRÁTICA	52
	Dimensionamento de um queimador ciclônico	
4	BIBLIOGRAFIA	88

## 1. INTRODUÇÃO

O fogo representou, desde os tempos mais remotos, a fonte principal de energia para a humanidade. Ainda hoje, as aplicações do processo físico-químico, conhecido com o nome de **COMBUSTÃO**, do qual o fogo e a chama são as manifestações visíveis, podem bem ser definidas como as estruturas suporte sôbre as quais repousa a grande construção da técnica moderna.

No sentido restrito, para nós, **COMBUSTÃO** é uma oxidação rápida, e exotérmica, em alta temperatura, de um combustível.

Do ponto de vista industrial clássico, combustíveis são materiais que reagem facilmente com uma substância comburente, produzindo grande quantidade de energia térmica e quase sempre luz. Devem também ainda, preencher satisfatoriamente a um conjunto de requisitos técnico-econômicos, como veremos mais adiante.

Segundo as previsões gerais contudo, de especialistas no setor, deverão passar alguns decênios ainda, até que a combustão perca o seu domínio no campo da produção de energia e de trabalho, vale dizer, sua posição proeminente entre as energias que a humanidade soube colocar a seu próprio serviço.

Chama-se comburente à substância a custo da qual se dá a combustão. No caso mais comum e que estudamos, o comburente é o oxigênio do ar. A composição percentual em volume do ar seco é:

$N_2$	78.03	Neônio	0.00123
$O_2$	20.99	Hélio	0.0004
Argônio	0.94	Kriptônio	0.00005
$CO_2$	0.03	Xenônio	0.000006
$H_2$	0.01		

São consideradas normalmente duas frações a saber:

$O_2$	20.99
Inertes, $N_2$ + gases raros	79.01

Em todos os cálculos técnicos adota-se 21%  $O_2$  e 79%  $N_2$  em volume e 23,2%  $O_2$  e 76,8%  $N_2$  em massa.

Para o início da combustão é necessário tanto a presença do combustível, como do comburente e da ignição. Essa ignição pode ser uma faísca ou uma fonte quente como fio incandescente ou chama piloto.

O emprego do carvão como combustível é ainda muito difundido no mundo não obstante o advento de fontes de energia mais simples. Na Inglaterra, Estados Unidos e Alemanha, ainda a maior parte de energia elétrica é gerada a partir de vários tipos de fósseis. Nos Estados Unidos, em vista das grandes reservas disponíveis, além de ser utilizado para queima direta, o mesmo é utilizado in diretamente, quando transformado em gases de PC's razoáveis, pelo processo de gaseificação.

Do ponto de vista químico o carvão é composto de hidrogênio, oxigênio,  $N_2$  e S com pequenas quantidades de outros constituintes de origem mineral. De um modo geral os carvões, no mundo, variam entre os seguintes valores:

C	80	-	90%
H	4	-	5%
O	5	-	10%
N	0,5	-	2%
S	0,3	-	1%



Para os combustíveis nacionais, principalmente considerando RS e SC temos:

		% base seca					
		C	H	N	O	S	CINZAS
	Leão	40,7	2,8	0,8	8,4	2	45,3
RS	Charqueadas	52,3	3,7	0,9	10,1	0,5	32,5
	Candiota	37	2,5	0,6	7	2,0	50,7
SC	Tubarão	46	3	1	-	3,0	47,0

A combustão do carvão se desenvolve em três estágios:

- 1 - Liberação das substâncias voláteis por ação de calor;
- 2 - Combustão das matérias voláteis em fase gasosa;
- 3 - Combustão de parte do material remanescente que ainda apresenta teor carbônico.

O ar que passa através do leito do combustível toma o nome de ar primário. O resto do ar introduzido sobre o leito é chamado de ar secundário. Esse ar serve para completar a combustão das substâncias voláteis (incluindo a fuligem) saídas do combustível, em seu estado preliminar de combustão.

Algumas vezes pode ser introduzido mais ar ulterior chamado ar terciário.

Durante o aquecimento, a temperaturas suficientemente elevadas, o carvão se decompõe dando lugar a alcatrão e uma mistura de gases combustíveis, anidrido carbônico, e vapor d'água que constituem as chamadas matérias voláteis.

A parte o monóxido de carbono e hidrogênio, os gases combustíveis são constituídos prevalecentemente de hidrocarbonetos.

A liberação das matérias voláteis é função da velocidade de preaquecimento e da granulometria do carvão. Com alta velocidade de preaquecimento e partículas pequenas há uma rápida liberação de matérias voláteis. Com pedaços de carvão de grandes dimensões e com velocidade de aquecimento limitada não se alcançam as condições de rápida decomposição exceto na superfície, por causa / do tempo necessário ao calor para penetrar no interior do pedaço e das matérias voláteis para alcançar a superfície.

A decomposição rápida do carvão pode acontecer somente com partículas menores de  $100\mu$ . Por este motivo o carvão é empregado em instalações modernas em pó, em suspensão em corrente de ar queimado em tempo curtíssimo, da ordem de segundos ou menos.

O dispositivo no qual é introduzido o carvão em pó bem como uma parte ou todo ar necessários para que a combustão se processe é denominado queimador.

Este deve proporcionar a mistura do ar com o pó, tanto antes como durante a combustão. Deve ser de tal forma, a permitir a regulação da quantidade do ar bem como do combustível.

Dos vários tipos de queimadores que possam ser encontrados, atualmente aquele que mais se tem desenvolvido e melhor se aplica / às condições necessárias para combustão do carvão, e que apresentam melhor rendimento, é o chamado ciclônico.

As figuras 01 e 02 , seguintes, esquematizam este tipo de queimador, escopo deste trabalho.



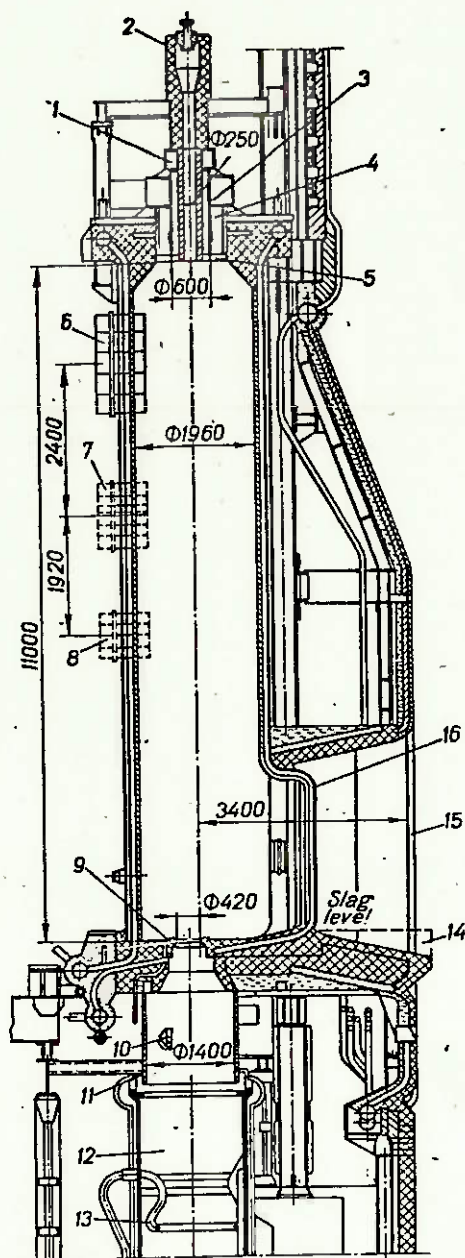


fig. 01 - Queimador Ciclônico Vertical

1—main burner; 2—pilot burner; 3 and 4—primary and secondary air inlets; 5—guide vane apparatus; 6, 7 and 8—rows of nozzles; 9—slag-drop opening; 10—unslagging handhole; 11—hydraulic seal; 12—slag box; 13—cold water inlet; 14—slag plate; 15—cooling chamber; 16—slag screen

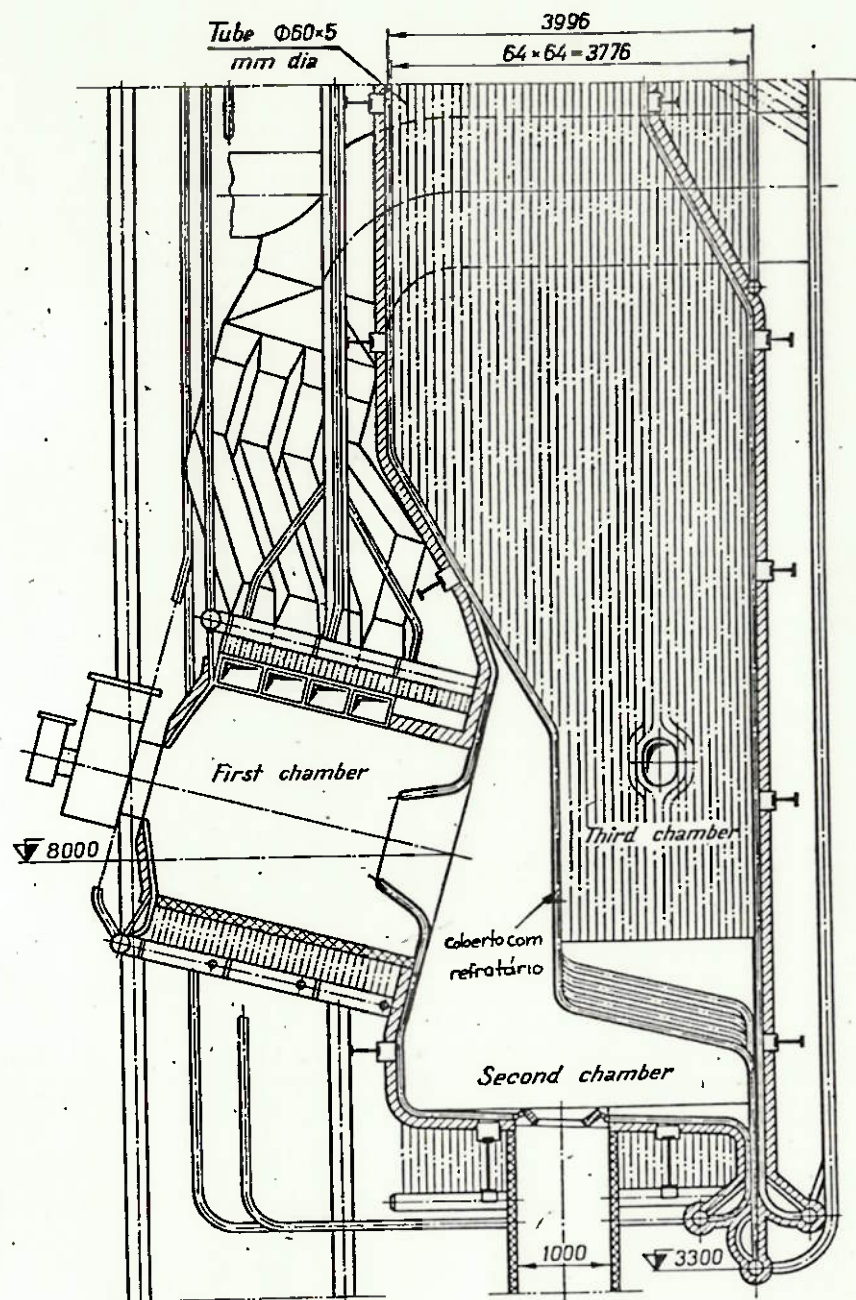


fig 02 - Queimador Ciclônico

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

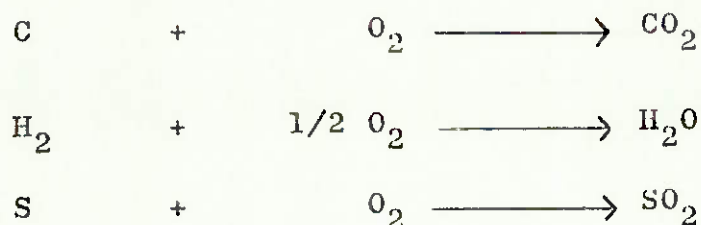
### 2.1 ESTUDO DA COMBUSTÃO

#### 2.1.1 Generalidades

De um modo geral as reações de combustão se dão na fase gasosa. Se o combustível for líquido, ele evapora e a reação do combustível se dá entre o vapor e o oxigênio. Para o combustível sólido, que é o nosso caso, a reação se dá na interface sólido-gás, havendo difusão do oxigênio no gás carbônico (e outros gases) para atingir a superfície do sólido.

#### 2.1.2 Combustão do Carvão

Quando se queima o carvão na presença de oxigênio, as reações mais importantes que se realizam são:



A composição dos produtos da combustão depende obviamente / das constantes de equilíbrio das várias reações consideradas.

Numa câmara de combustão usual, o estado de equilíbrio termodinâmico não é nunca alcançado pois as velocidades das reações acima mencionadas, são geralmente muito lentas, em relação às velocidades de saída dos produtos de combustão.

As constantes de equilíbrio das reações consideradas acima dependem obviamente da temperatura. As reações diretas são favorecidas pelo aumento de temperatura que por sua vez favorece os fenômenos de dissociação (Fig. 03)



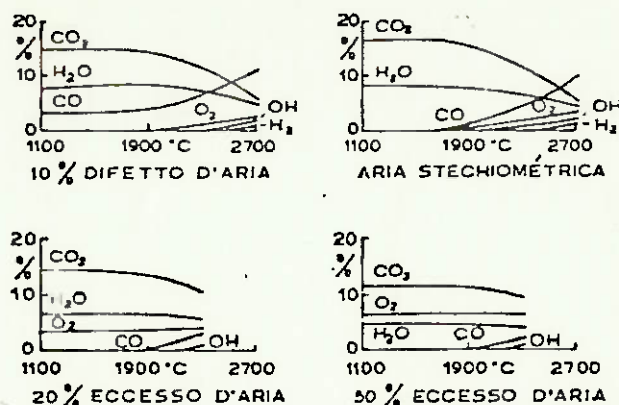


fig. 03 - Composição de equilíbrio dos produtos de combustão de um carvão tipo linhi-  
to com 10 % de umidade.

A figura 04 evidencia a variação de composição dos gases da combustão com a temperatura utilizando quantidades de ar maiores e menores do que a estequiométrica. A relação ar/com-bustível influe notavelmente na temperatura da combustão. A temperatura da chama é reduzida além, de pelo efeito das reações de dissociação, também pelo excesso de ar empregado e pelas perdas de calor para o ambiente circundante e das partículas suspensas nos produtos da combustão.

A temperatura de chama pode ser aumentada preaquecendo o ar de combustão. A figura 05 mostra a temperatura de chama de uma combustão estequiométrica de um linhito em função das temperaturas de preaquecimento do ar considerando várias perdas de calor.

Como pode-se notar pela figura, as temperaturas de chama além dos 2.300 °C necessitam de preaquecimento de ar superior aos 800°C o que leva a dificuldades técnicas ligadas à escolha de materiais para os trocadores de calor.

Nestes casos resulta mais interessante o emprego de ar enriquecido com oxigênio.

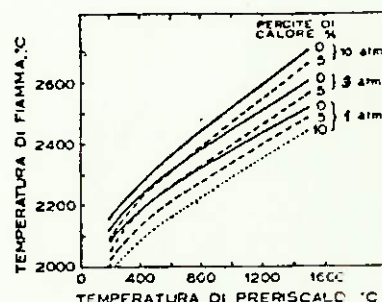


fig. 05 - Temperatura teórica -  
da chama de um linhito  
em ar com diversas temperaturas de pré-aqueci-  
mento de ar.



As cinzas de um carvão são constituídas em parte dos materiais minerais incombustíveis, dos vegetais dos quais o carvão deriva, em parte do material terroso ligado a esses vegetais e em parte de argila calcária extraída juntamente com o carvão da mina.

Quando o carvão queima, cada uma dessas substâncias contribue para a formação das cinzas. O conjunto destes resíduos minerais de ponto de fusão relativamente baixo, misturados intimamente, dá lugar, frequentemente, a uma mistura tipo eutético de ponto de fusão ainda menor.

O comportamento dos constituintes químicos das cinzas é muito interessante. Os óxidos de ferro de valência maior ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), por exemplo, não se combinam com o silício enquanto que o óxido ferroso que se forma em condições redutoras, tende a formar um silicato de baixo ponto de fusão.

O óxido de Ferro intermediário comporta-se como o  $\text{FeO}$  e outras vezes sendo ele próprio facilmente fusível pode abaxiar o ponto fusão das cinzas, sem se combinar com o silício.

Em condições redutoras ou semiredutoras, cinzas contendo / grandes quantidades de óxidos de Ferro podem portanto contribuir notavelmente à formação de clinker. Outros silicatos separadamente ou em combinação podem também contribuir à formação de escória, em presença seja de atmosferas oxidantes como redutoras.

Para obter indicações sobre a tendência à formação de clinker é oportuno determinar o ponto de fusão das cinzas do carvão. Para fazer essa determinação, as cinzas, na forma de pó fino são prensadas na forma de cone do qual se determina a temperatura de amolecimento ou fusão em forno de laboratório.

A moagem fina contribue para colocar em íntimo contacto, os constituintes das cinzas e o cone pode ainda fundir a uma temperatura mais baixa do que a característica do material não pulverizado.



As cinzas dos carvões podem ser classificadas, segundo seu ponto de fusão em:

- GRUPO 1 - Ponto de fusão acima de  $1.400^{\circ}\text{C}$  - nenhuma formação de clinker.
- GRUPO 2 - Ponto de fusão entre  $1.200$  e  $1.400^{\circ}\text{C}$  possível formação de clinker sem sérios problemas.
- GRUPO 3 - Ponto de fusão inferior a  $1.200^{\circ}\text{C}$  sérias possibilidades de formação de clinker.

Tabela característica dos carvões do RS e SC

CARACTERÍSTICAS DOS CARVÕES COMERCIAIS DO RIO GRANDE DO SUL E SANTA CATARINA

TABELA 01

Origem dos Carvões		Análise Imediata (b.s.) %					Poder Calor. kcal/kg	Análise Elementar %				
		Carb Fixo	Mats Vols	Cinzas	Enx	Umid.		C	H	N	O	S
RS	Mina do Leão	35	26	45,3	2	9,2	4.400	40,7	2,8	0,8	8,4	2,0
	Mina Charqueadas	39	20	32,5	0,8	11,6	5.045	52,3	3,7	0,9	10,1	0,5
	Mina Candiota	28	22	50,7	2	8,3	3.200	37	2,5	0,8	7	2,0
SC	Mina Tubarão	36	24	47,0	3	5,4	4.500	46	3	1	-	3

TABELA 02

Origem dos Carvões Minas		ANÁLISE DAS CINZAS %											Pont.de amolec. (atm.oxid) $^{\circ}\text{C}$
		$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_2$	MgO	CaO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{MnO}_2$	
RS	do Leão	62,4	23,7	14,1	0,9	2,4	0,4	0,7	2,0	1,2	0,2	<0,1	1.350
	Charqueadas	63,1	23,0	2,9	0,6	3,1	1,1	1,3	-	1,2	<0,1	<0,1	1.450
	Candiota	70,0	20,0	4,9	0,6	0,6	0,1	1,4	0,2	0,9	0,1	<0,1	1.350
SC	Tubarão	49,2	26,6	9,0	2,6	2,2	0,2	2,6	-	2,5	0,1	4,5	1.300

### 2.1.3 Estequiometria da combustão

Para o cálculo preciso do volume de ar necessário e de gases formados na combustão, nas reações químicas, empregam-se os volumes normais para os combustíveis gasosos e a massa do combustível, quando sólido, ao invés dos moles.

Para transformar os moles em metros cúbicos normais lança-se mão da lei de Avogadro de acordo com a qual, para todos os gases ideais, às mesmas condições de pressão e temperatura, o número de moléculas contidas no mesmo volume é constante. Como volume de referência usa-se o volume molar de  $22,4\text{m}^3$  no qual, às condições normais de pressão e temperatura, estão contidas  $6,023 \times 10^{26}$  átomos ou moléculas de um gás ideal.

Para gases reais e vapores o volume molar não é exatamente  $22,4\text{ Nm}^3$  e, portanto, damos abaixo os valores, diferindo ligeiramente de valor de Avogadro, que, segundo E. Justis são:

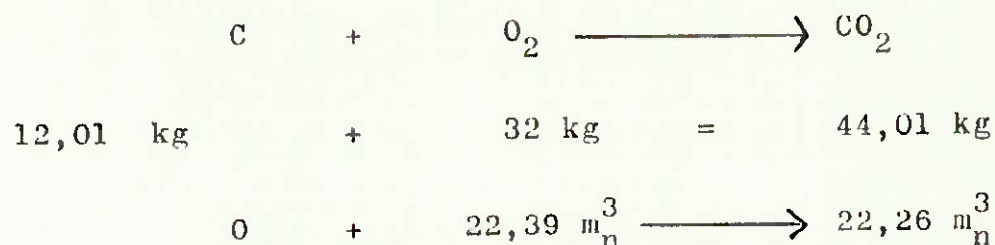
TABELA 03

	Volume molar $\text{Nm}^3 / \text{kgmol}$
$\text{O}_2$	22,39
$\text{CO}_2$	22,26
$\text{SO}_2$	21,89
$\text{N}_2$	22,40
$\text{H}_2\text{O}$	22,40
$\text{CO}$	22,4
$\text{H}_2$	22,43
$\text{Ar}$	22,4

O dado para o vapor d'água é um valor hipotético, pois, não pode existir como vapor a 1 atm e  $0^\circ\text{C}$ .

### 2.1.3.1 Ar necessário à Combustão

O carbono queima conforme a seguinte reação



Nesta reação o volume de carbono é desprezado por ser muito pequeno em relação aos demais componentes.

$$\frac{1 \text{ kg de C requer}}{12,01} \frac{32,0}{12,01} \text{ kg O}_2 = 2,664 \text{ kg O}_2$$

ou

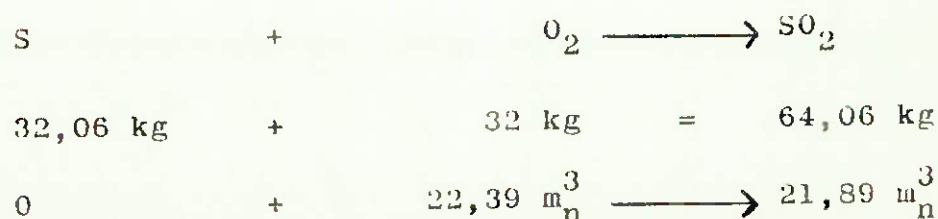
$$\frac{22,39}{12,01} = \text{m}_n^3 \text{ O}_2 = 1,864 \text{ m}_n^3 \text{ O}_2$$

1 kg de C dá lugar à formação de

$$\frac{44,01}{12,01} \text{ kg CO}_2 = 3,664 \text{ kg CO}_2$$

$$\frac{22,26}{12,01} \text{ m}_n^3 \text{ CO}_2 = 1,8535 \text{ m}_n^3 \text{ CO}_2$$

A combustão do enxofre pode ser analisada da mesma forma ou seja:



$$\underline{1 \text{ kg de S requer}} \quad \frac{32}{32,06} \quad \text{kg } O_2 = 0,998 \text{ kg } O_2$$

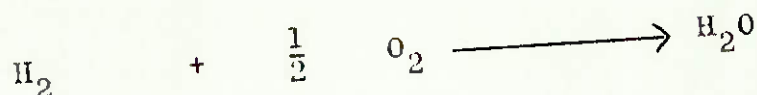
$$\text{ou} \quad \frac{22,39}{32,06} \quad m_n^3 O_2 = 0,697 m_n^3 O_2$$

1 kg de S dá lugar à formação de

$$\frac{64,06}{32,06} \quad \text{kg } SO_2 = 1,996 \text{ kg } SO_2$$

$$\text{ou} \quad \frac{21,89}{32,06} \quad m_n^3 SO_2 = 0,683 m_n^3 SO_2$$

A reação de combustão do hidrogênio é:



$$2,016 \text{ kg} + 16 \text{ kg} = 18,016 \text{ kg}$$

$$22,43 m_n^3 + 11,195 m_n^3 \longrightarrow 22,4 m_n^3$$

1 kg de H<sub>2</sub> necessita de

$$\frac{16}{2,016} \quad \text{kg } O_2 = 7,94 \text{ kg } O_2$$

$$\text{ou} \quad \frac{11,195}{2,016} \quad m_n^3 O_2 = 5,56 m_n^3 O_2$$

1 kg de H<sub>2</sub> dá ensejo à formação de

$$\frac{18,016}{2,016} \quad \text{kg } H_2O = 8,94 \text{ kg } H_2O$$

$$\frac{22,4}{2,016} \quad m_n^3 H_2O = 11,11 m_n^3 H_2O$$

Para o cálculo do oxigênio necessário à combustão de 1 kg de combustível sólido ou líquido, partir-se-á das reações dos diferentes componentes. O volume de  $O_2$  teoricamente necessário à combustão completa de 1 kg de combustível - composto de:

c kg de C

h kg de  $H_2$

s kg de S

o kg de  $O_2$

n kg de  $N_2$

$$\text{será } V_{O_2}^0 = \left[ 1,864 c + 5,56 \left( h - \frac{o}{8} \right) + 0,697 s \right] m_n^3 / \text{kg}$$

O volume mínimo de ar necessário, correspondente, será

$$V_{ar}^0 = \frac{100}{21} V_{O_2}^0 = 8,977 (c) + 26,443 (h) + 3,66 (s) - 3,332 (o) m_n^3 / \text{kg comb.}$$

e em massa teríamos

$$L_{ar}^0 = V_{ar}^0 \times 1,2928 \text{ kg, sendo } 1,2928 \text{ kg/m}^3 \text{ o peso específico do ar às condições normais.}$$

$$\text{A relação entre } \frac{V_{ar}}{V_{ar}^0} = m \quad \text{ou} \quad \frac{L_{ar}}{L_{ar}^0} = m$$

é o coeficiente de excesso de ar, pois, na combustão prática para evitar a falta de ar, em certos pontos da fornalha, havendo excesso em outros, a quantidade de ar insuflado, se rá sempre superior à mínima ou teoricamente necessária.

O excesso de ar é dependente do combustível, do seu estado físico e de agregação e de sua granulação se sólido; do tipo de fornalha e do queimador, conforme resulta das tabelas 07 e 08 do Anexo II (pág. 83 e 84).

### 2.1.3.2 Volume dos gases produzidos na Combustão

Baseados nas reações de combustão dos componentes do combustível, podemos determinar o volume mínimo de gases de combustão em  $m_n^3 / kg$

$$V_g^0 = \underbrace{\overbrace{1,8535 (c)}^{CO_2} + \overbrace{0,683 (s)}^{SO_2} + \overbrace{0,8 (n) + V_{ar}^0 \cdot 0,79}^{N_2}}_{V_g^s} + \left[ 9 (h) + w \right] 1,24$$

Em relação ao  $N_2$  supõe-se que o mesmo, após a combustão, esteja na forma gasosa, sendo seu volume específico  $0,8 m_n^3 / kg$

$V_g^s$  é o volume de gases na base seca em  $m_n^3 / kg$  combustível - vel.

$\left[ 9 (h) + w \right]$  é a quantidade de água, em peso, formada na combustão.

Havendo excesso de ar, o volume dos gases passa a ser:

$$V_g = V_g^0 + (m-1) V_{ar}^0 \quad \text{em } m_n^3 / kg \text{ combustível.}$$



### 2.1.3.3 Temperatura Adiabática da Chama

Consideremos um processo de combustão que ocorre adiabaticamente, sem envolver trabalho ou variações de energia cinética ou potencial. Para esse processo a temperatura atingida pelos produtos é chamada temperatura adiabática da chama. Admitindo-se que não tenha sido trocado trabalho, e que não ocorreram variações de energia cinética ou potencial esta é a temperatura máxima que pode ser atingida pelos reagentes porque qualquer transmissão de calor das substâncias reagentes e qualquer combustão incompleta tenderia a diminuir a temperatura dos produtos.

Embora a máxima temperatura adiabática da chama seja alcançada para a combustão estequiométrica, esta pode ser controlada pela quantidade de excesso de ar que é utilizada e pela temperatura de pré-aquecimento do ar. Suporemos porém que este último não ocorra, pois queremos apenas um valor estimativo mínimo.

Para o seu cálculo parte-se da equação de combustão que ocorre entre os reagentes.

Com as hipóteses anteriormente estabelecidas, a primeira lei da termodinâmica reduzir-se-á a:

$$H_r = H_p \quad \therefore \quad \sum_r n_e \left[ h_f^o + \Delta h \right]_e = \sum_p n_s \left[ h_f^o + \Delta h \right]_s$$

onde:

$h_f$  - entalpia de formação da substância à 25°C e 1 atm

$\Delta h$  - variação de entalpia da temperatura à 25°C e 1 atm para a temperatura considerada.

$n_e$  - número de moles de cada reagente

$n_s$  - número de moles de cada produto

No primeiro membro da equação acima tem-se o combustível e o comburente, ambos considerados à 25°C e 1 atm.

Por outro lado o ar é admitido como composto por substâncias elementares ( $O_2$  e  $N_2$ ) e nestas, a entalpia de formação ( $h_f^o$ ) é igual a zero.

Portanto o primeiro membro se reduz à entalpia de formação do combustível ( $h_{fcomb}^o$ ).

Resumindo, tem-se assim:

$$h_{fcomb}^o = \sum_p n_s \left[ h_f^o + \Delta h \right]_s \quad \text{ou:}$$

$$h_{fcomb}^o - nh_{fco_2}^o - nh_{fso_2}^o - nh_{fh_2o}^o = n \Delta h_{co_2} + n \Delta h_{so_2} +$$

$$+ n \Delta h_{h_2o} + n \Delta h_{o_2} + n \Delta h_{n_2}$$

A temperatura dos produtos, que é a temperatura adiabática da chama, é determinada resolvendo-se esta última equação por processo iterativo; observa-se, porém, que na realidade a temperatura alcançada será maior que esta, devido ao pré-aquecimento do ar.

Os componentes desta equação podem ser calculados como segue:

a) 1º Membro:

para os combustíveis conhece-se o p.c.i. (poder calorífico inferior)  $\left[ \text{kcal/kgcomb} \right]$

Tendo-se a sua composição calcula-se o peso molecular  $\left[ \text{gramas} \right]$

Por outro lado:

$$h_{fcomb}^o = nh_{fco_2}^o + nh_{fh_2o}^o + nh_{fso_2}^o + PCI \quad \text{portanto}$$

$$PCI = h_{fcomb}^o - nh_{fco_2}^o - nh_{fh_2o}^o - nh_{fso_2}^o \quad \text{ou}$$

$$1^\circ \text{ membro} = PCI \left[ \text{kcal/kgcomb} \right] \quad \text{ou ainda}$$

$$1^\circ \text{ membro} = PCI \cdot M \left[ \text{kcal/kgmol} \right]$$

b)  $h_f^o$ s:

São dados abaixo os valores de entalpia de formação dos principais produtos da combustão:

$$h_{fco_2}^o = - 94.054 \quad \text{kcal/kgmol}$$

$$h_{fh_2o}^o = - 57.798 \quad \text{kcal/kgmol}$$

$$h_{fso_2}^o = - 70.873 \quad \text{kcal/kgmol}$$

c)  $\Delta h_s$ :

Sabemos que:

$$\Delta h = C_{p2} \cdot t_2 - C_{p1} \cdot t_1 \quad ("t" \text{ em } ^\circ\text{C})$$

Nas CNTP,  $t_1 = 25^\circ\text{C}$  e para cada um dos produtos, tem-se os  $C_{ps}$ :

$$C_{p\text{co}_2} = 8,81 \text{ kcal/kgmol } ^\circ\text{C}$$

$$C_{p\text{o}_2} = 7,97 \text{ kcal/kgmol } ^\circ\text{C}$$

$$C_{p\text{h}_2\text{o}} = 7,96 \text{ kcal/kgmol } ^\circ\text{C}$$

$$C_{p\text{so}_2} = 9,43 \text{ kcal/kgmol } ^\circ\text{C}$$

$$C_{p\text{n}_2} = 6,94 \text{ kcal/kgmol } ^\circ\text{C}$$

Assim, segue:

$$\Delta h_{\text{co}_2} = C_{p2} \cdot T_2 - 8,81 \cdot 25 \rightarrow \Delta h_{\text{co}_2} = C_{p2} \cdot t_2 - 220,25$$

$$\Delta h_{\text{h}_2\text{o}} = C_{p2} \cdot T_2 - 7,96 \cdot 25 \rightarrow \Delta h_{\text{h}_2\text{o}} = C_{p2} \cdot t_2 - 199,00$$

$$\Delta h_{\text{so}_2} = C_{p2} \cdot T_2 - 9,43 \cdot 25 \rightarrow \Delta h_{\text{so}_2} = C_{p2} \cdot t_2 - 235,75$$

$$\Delta h_{\text{o}_2} = C_{p2} \cdot T_2 - 7,97 \cdot 25 \rightarrow \Delta h_{\text{o}_2} = C_{p2} \cdot t_2 - 199,25$$

$$\Delta h_{\text{n}_2} = C_{p2} \cdot T_2 - 6,94 \cdot 25 \rightarrow \Delta h_{\text{n}_2} = C_{p2} \cdot t_2 - 173,50$$

Onde  $t_2$  é a temperatura admitida e  $C_{p2}$  o calor, específico à pressão constante nesta temperatura.

A seguir, veremos os valores de  $C_p$  em função da temperatura para algumas substâncias, conforme tabela 04.

TABELA 04

—MEAN SPECIFIC HEAT OF GASES BETWEEN 0 AND  $t^{\circ}\text{C}$ . AND AT  
ZERO PRESSURE

Units: g.-cal. g.-mole

$t^{\circ}\text{C}$ .	$\text{H}_2$	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	$\text{CO}$	$\text{NO}$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{SO}_2$	Air
100	6.92	6.97	7.05	6.97	7.14	8.03	9.17	9.79	9.74	6.96
200	6.95	7.00	7.15	7.00	7.17	8.12	9.65	10.12	10.15	7.01
300	6.97	7.04	7.26	7.06	7.22	8.22	10.06	10.45	10.52	7.06
400	6.98	7.09	7.38	7.12	7.30	8.34	10.40	10.74	10.81	7.13
500	6.99	7.15	7.49	7.19	7.38	8.47	10.75	11.02	11.11	7.20
600	7.01	7.21	7.59	7.27	7.46	8.60	11.03	11.24	11.35	7.27
700	7.03	7.27	7.68	7.34	7.54	8.74	11.28	11.50	11.55	7.34
800	7.06	7.35	7.77	7.43	7.62	8.89	11.50	11.71	11.72	7.42
900	7.09	7.42	7.85	7.50	7.70	9.04	11.70	11.90	11.88	7.49
1000	7.12	7.49	7.92	7.57	7.76	9.18	11.88	12.07	12.01	7.56
1100	7.15	7.56	7.98	7.64	7.83	9.32	12.05	12.21	12.13	7.62
1200	7.20	7.62	8.04	7.70	7.89	9.45	12.19	12.35	12.23	7.68
1300	7.24	7.67	8.11	7.76	7.94	9.58	12.32	12.48	12.33	7.73
1400	7.28	7.73	8.16	7.81	7.99	9.72	12.45	12.60	12.41	7.78
1500	7.32	7.78	8.20	7.85	8.03	9.84	12.56	12.69	12.48	7.84
1600	7.36	7.82	8.24	7.90	8.08	9.96	12.66	12.78	12.55	7.88
1700	7.40	7.86	8.28	7.94	8.12	10.09	12.75	12.88	12.61	7.92
1800	7.45	7.91	8.33	7.98	8.15	10.20	12.84	12.95	12.67	7.96
1900	7.49	7.94	8.38	8.02	8.19	10.30	12.92	13.01	12.71	7.99
2000	7.53	7.98	8.42	8.05	8.22	10.41	12.99	13.09	12.77	8.03
2100	7.57	8.01	8.45	8.09	8.26	10.52	13.06	13.17	12.81	8.06
2200	7.62	8.05	8.48	8.12	8.29	10.61	13.13	13.21	12.85	8.08
2300	7.66	8.08	8.52	8.15	8.31	10.71	13.19	13.28	12.89	8.12
2400	7.70	8.10	8.56	8.18	8.34	10.79	13.24	13.33	12.93	8.14
2500	7.74	8.14	8.59	8.21	8.36	10.87	13.30	13.38	12.96	8.18
2600	7.78	8.17	8.63	8.24	8.38	10.96	13.34	13.42	12.99	8.20
2700	7.81	8.19	8.65	8.26	8.40	11.03	13.39	13.46	13.02	8.23
2800	7.85	8.22	8.68	8.28	8.42	11.11	13.43	13.51	13.04	8.25
2900	7.89	8.24	8.72	8.30	8.44	11.18	13.48	13.55	13.07	8.27
3000	7.92	8.26	8.76	8.32	8.45	11.23	13.52	13.59	13.10	8.29

## 2.2 ASPECTOS FÍSICOS

### 2.2.1 Temperatura de ignição do Combustível Sólido

Em igualdade de outras condições, a temperatura de ignição depende essencialmente do grau de reatividade do combustível sólido com o comburente, por sua vez função da porosidade do material e de seu conteúdo em materiais voláteis. Essa temperatura depende também das dimensões das partículas mas, na prática, a temperatura de ignição para os vários combustíveis sólidos, medida em diferentes condições de ensaio, varia entre 100 a 150°C.

O mecanismo de ignição depende da forma de transmissão de calor na superfície a ser acendida (convectiva ou radiante). No caso de leitos com alimentação do ar por baixo e do combustível pelo alto a ignição se dá por irradiação. Há porém também um efeito convectivo secundário gerado pelos gases quentes que sobem e secam as camadas superiores do combustível ainda não em reação.

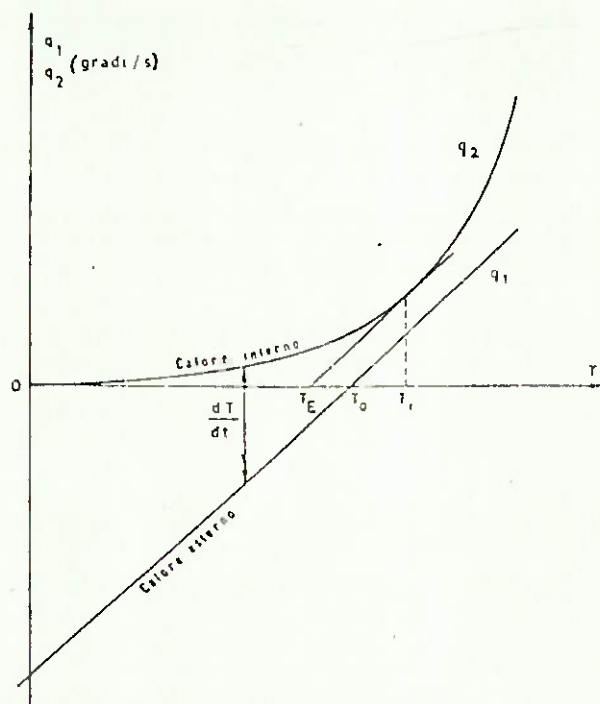


fig. 06 - Variação da velocidade de aquecimento da partícula na reação de oxidação em função da temperatura reinante na câmara.

A temperatura de ignição depende também da relação  $\text{CO}/\text{CO}_2$  dos gases por sua vez ligados à relação ar/combustível.

O mecanismo de ignição deve levar em conta tanto o calor que chega às partículas do exterior como do calor produzido na sua massa, por efeito da reação de oxidação, com andamento que tende a tornar-se cada vez mais rápido com o aumento da temperatura de superfície.

Se chamamos de  $q_1$  e  $q_2$  os incrementos de temperaturas referidos à unidade de tempo, devido respectivamente ao calor externo e ao interno e se levarmos a um gráfico estes dois parâmetros com a temperatura, obtem-se andamento do tipo apresentados pela fig. 06.

A velocidade de aquecimento total  $\frac{dT}{dt}$  obtem-se com a diferença entre as ordenadas das duas curvas:

$$\frac{dT}{dt} = q_2 - q_1$$

$q_1 (T)$  é a velocidade de aquecimento em função da troca de calor das partículas com o ambiente.

$q_2 (T)$  é a velocidade de aquecimento em função das reações de oxidação.

Se as duas curvas não se interceptam verifica-se o acendimento das partículas, com início de reação da combustão e a curva temperatura/tempo toma a forma representada por II na fig. 07 a (a curva I corresponde ao andamento da temperatura para troca térmica com o ambiente somente). A temperatura  $T_1$  corresponde à temperatura real de ignição.

Se as duas curvas  $q_1 (T)$  e  $q_2 (T)$  se encontram, a abscissa do ponto de intersecção corresponde a uma temperatura



limite, superior a  $T_0$  (temperatura ambiente) à qual o calor liberado na oxidação está em equilíbrio com o calor cedido pelas partículas ao ambiente (curva II fig. 07 b).

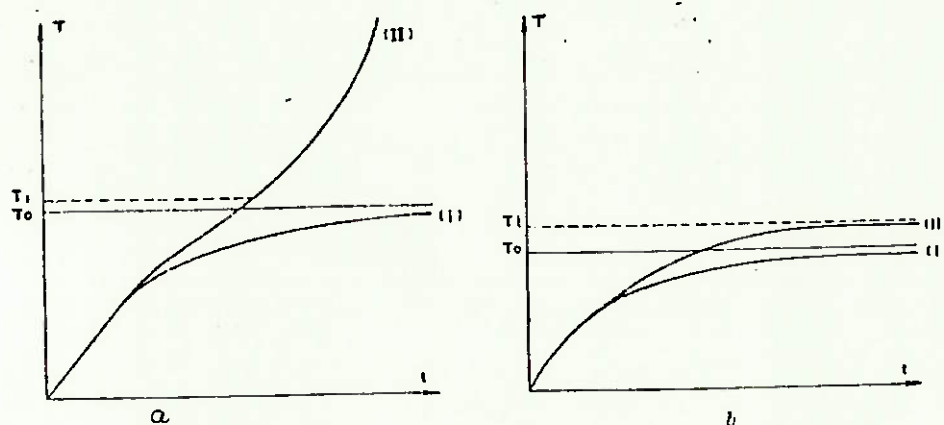


fig. 07 - Acendimento da partícula próxima ao ponto de ignição.

a) Ignição

b) Temperatura limite de oxidação

### 2.2.2 Combustão nos jatos de carvão pulverizado

O combustível sólido utilizado neste tipo particular de combustão deve ser previamente moído de modo que as partículas tenham diâmetro por volta de  $50 \mu$ . Neste estado o carvão é injetado juntamente com um jato de ar, (jato primário) numa câmara de combustão, aonde se mistura mais ou menos rapidamente com outros jatos de ar (secundário e terciário) e também com os produtos de combustão, retornados à zona de entrada do queimador por efeito de correntes (internas de recirculação). Os grãos de carvão se aquecem por efeito de irradiação das paredes do forno e da chama e por contacto com os gases de recirculação (fig. 08). A uma certa distância do queimador inicia-se a combustão com uma frente estacionária / de chama, no qual o combustível é completamente queimado num tempo de pouco mais de um segundo enquanto as temperaturas alcançam e superam os  $1500^{\circ}\text{C}$ .

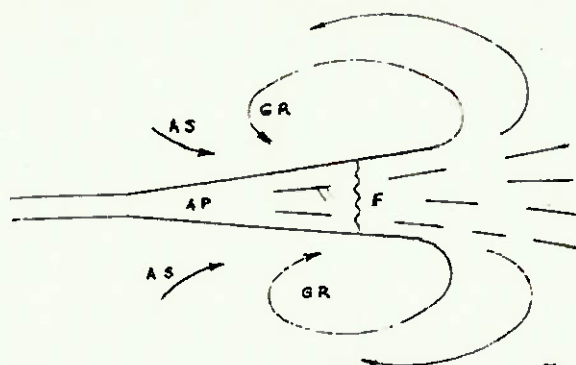


fig. 08 - Mistura de grãos de carvão com ar e o gás de recirculação numa câmara de carvão pulverizado.

AP - Ar primário

AS - Ar secundário

GR - Gás de recirculação

F - Chama

Os fenômenos que governam as características da chama são de 3 tipos:

- 1 - Fenômenos químicos: reação de pirólise do carvão, reações de combustão seja do sólido que dos produtos gasosos liberados na pirólise.
- 2 - Fenômenos aerodinâmicos: determinam o tipo de fluxo - dos jatos primários e secundários e da mistura do carvão com o ar.
- 3 - Fenômenos térmicos: trocas de calor entre as chamas e as paredes e entre as diversas partes das chamas.

A velocidade da combustão depende, outrossim dos seguintes parâmetros:

- Concentração em oxigênio em volta de cada partícula de carvão.
- Temperatura ambiente, função por sua vez das trocas térmicas.

- Velocidade relativa das partículas com relação ao ar, função da aerodinâmica do sistema que por sua vez é fortemente influenciada pela temperatura existente na câmara de combustão.

As grandes interações existentes entre os vários fenômenos - tornam extremamente difícil o estudo teórico e experimental de uma chama de carvão pulverizado.

Observações práticas realizadas com relação a esse processo levam a definir as seguintes situações:

#### 2.2.2.1 Combustão à baixa temperatura

- 1 - Nestas condições prevalece a cinética química. A velocidade de reação é proporcional à área superficial, que varia no decurso da combustão por causa da evolução da estrutura fina do carvão. (aumento do diâmetro dos poros, desgaste, consumo dos grãos, etc.). Tem grande influência sobre a velocidade de combustão certos tipos de impurezas, óxidos metálicos e, em geral a velocidade é tanto mais elevada quanto menor o conteúdo de cinzas.
- 2 - A reação é de ordem fracionária, dá origem simultânea a CO e CO<sub>2</sub>. A relação das frações molares destes grãos depende da temperatura e da porcentagem de cinzas.
- 3 - No campo de temperaturas de 500 - 650 °C a energia de ativação é de cerca de 60 kcal/mol para grafite puríssima e 40 kcal/mol para a impura.  
Da fórmula de ARRHENIUS

$$K = A e^{\left( \frac{-E}{RT} \right)}$$

- E - energia de ativação  
A - fator de frequência  
K - Constante reação.

O fator A varia inversamente a E. Assim a uma dada temperatura um grafite puríssimo, como foi afirmado, queima com menor velocidade do que um contendo cinzas.

Levando em consideração carvões de alto teor de matérias voláteis constata-se que a sua velocidade de combustão é inferior à da grafite, com energia de ativação de 14-18 kcal/mol e a reação é de ordem próxima da unidade.

#### 2.2.2.2 Combustão à média temperatura

PARKER E HOTTEL evidenciaram a existência de uma zona de transição entre o regime de difusão interno das partículas e o da difusão externa, que se manifesta com o aumento da temperatura.

Foram feitas experiências de combustão abaixo de 700-800 °C, com esferinhas de diâmetro 20-25 mm e foi possível demonstrar que a velocidade de combustão  $V_s$  cresce exponencialmente com o aumento da temperatura, enquanto que é pouco influenciada pelo aumento da velocidade do ar (Fig. 09); a energia de ativação é de 20-30 kcal/mol.

Operando a 900-1000°C a influência da temperatura é reduzida e ao contrário  $V_s$  passa a crescer muito com o aumento da velocidade do ar.

Evidentemente nestas condições a reação é controlada pela difusão externa e a lei de variação do coeficiente de difusão em função da velocidade  $V$  do ar é análoga à de um coeficiente de convecção.

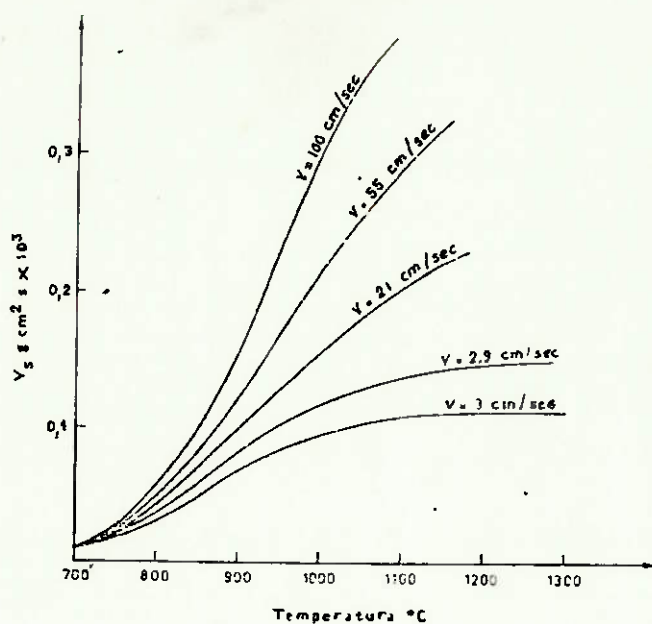


fig 09 - Variação da velocidade de combustão com a temperatura e com a velocidade do ar.

### 2.2.2.3 Combustões a altas temperaturas e com partículas de pequenos diâmetro

Enquanto que com grãos de 20-25 mm de diâmetro o regime de transição entre difusão interna e difusão externa se encontra no campo de temperaturas de 800-1000  $^{\circ}\text{C}$  com as partículas de diâmetro da ordem de algumas dezenas de micra o regime de transição se desloca para temperaturas mais elevadas.

A determinação experimental destes valores é muito difícil por causa dos pequenos diâmetros e altas temperaturas em jogo. A duração da combustão é extremamente breve (da ordem de um segundo) e portanto é praticamente impossível seguir a evolução da combustão de uma partícula sozinha.

Alguns autores afirmam que uma câmara de combustão de carvão pulverizado é o caso de domínio da difusão externa com velocidade de combustão que não é influenciada quase pela



Outros, ao contrário afirmam que entre 1200 e 1500°C, a temperatura exerce uma notável influência e que mesmo nestas condições a reação é controlada pela cinética química, ou pelo menos pela difusão interna.

Certos autores russos concluem que o regime de difusão externa só é alcançado em temperaturas de 1500 a 1700°C.

A fig. 10, mostra a velocidade de propagação da chama em mistura de ar e carvão pulverizado de diversas composições.

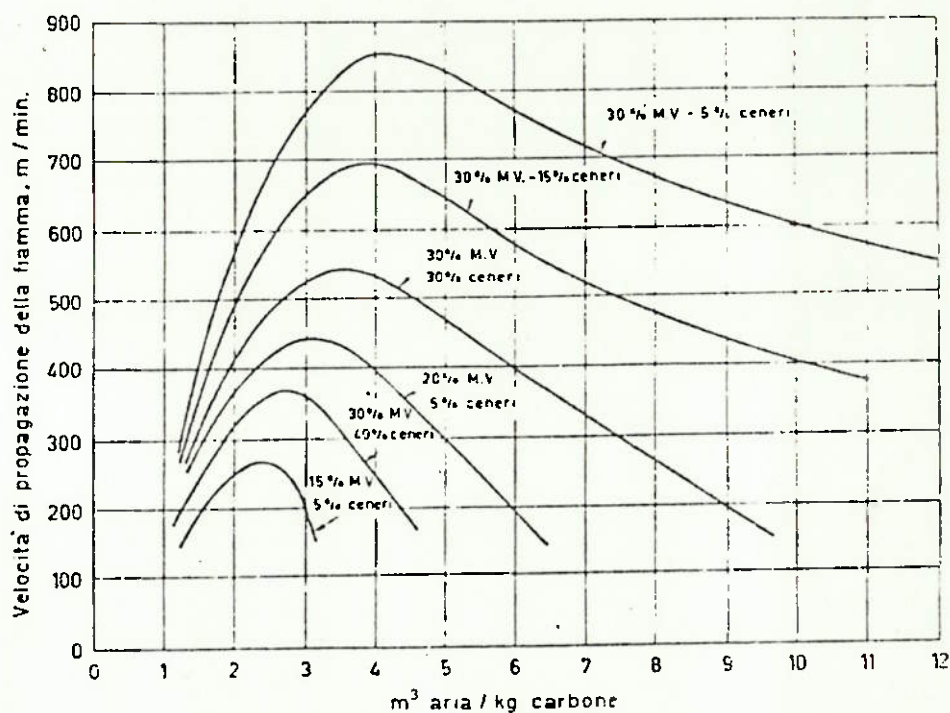


fig. 10 - Variação da velocidade da chama de vários tipos de carvões em função da relação / combustível/ar e da qualidade dos carvões MV (matérias voláteis)



### 2.2.3 Papel desempenhado pelas Matérias Voláteis, na Combustão do Carvão Pulverizado

As matérias voláteis, destiladas dos carvões por efeito de aquecimento, começam a se liberar em temperaturas por volta dos  $500^{\circ}\text{C}$ , essas são constituídas geralmente de vapores de alcatrões de massa molecular elevada, em condições de se inflamarem a baixa temperatura e com alta velocidade de combustão.

Dado que a  $500^{\circ}\text{C}$  a velocidade de oxidação da matéria carbonosa é muito lenta, a contribuição destas substâncias para o aquecimento das partículas e à aceleração da velocidade de combustão assume um papel importante.

Conforme a natureza do carvão considerado, há fenômenos diferentes. Com os carvões gordos de alto teor de matérias voláteis a pirólise se inicia aos  $400^{\circ}\text{C}$ , com formação abundante de alcatrões que dada a baixa temperatura de superfície das partículas, não pode queimar imediatamente após o seu aparecimento.

Forma-se assim em volta do grão, uma cobertura gasosa que se opõe à difusão do oxigênio na direção do sólido.

A combustão dessas matérias voláteis se verifica neste caso em fase gasosa, a uma certa distância da partícula, com uma cinética que se assemelha à da combustão de um líquido altamente pulverizado. (A quantidade de combustível que lá chega por difusão da superfície e a quantidade de oxidante supõe-se ser estequiométrica).

É claro que, nestas condições, a tendência ao acendimento é determinada inteiramente pela cinética de liberação das matérias voláteis e não depende mais da reatividade do carvão.

Com os carvões magros o piso da pirólise é em torno de  $550^{\circ}\text{C}$ . As pequenas quantidades de alcatrões que se formam têm condições de se oxidar, rapidamente no ato de sua formação, praticamente na superfície das partículas.

A sua combustão acontece simultaneamente com a reação de oxidação do carvão e o calor assim produzido contribue forte

mente para o aquecimento das partículas.

A tendência ao acendimento do carvão é determinada assim, seja pela reatividade do carvão quer pela cinética de formação das matérias voláteis.

#### 2.2.4 Irradiação das chamas luminosas

Quando se projetam instalações industriais de combustão é necessário determinar, a priori, qual o combustível mais indicado para a aplicação desejada. Deve ser também localizada a aparelhagem mais adequada a criar chamas eficientes - com a finalidade de obter uma elevada transmissão de calor, com área de aquecimento mínima e uma câmara de combustão menor possível.

Por eficiência térmica de uma chama, numa câmara de combustão, entende-se a relação entre o calor absorvido pela matéria a ser aquecida, ou transformada em energia, e o calor total liberado durante a combustão. Esta relação pode ser melhorada diminuindo o calor levado para fora do sistema pelos gases queimados ou o perdido para o exterior por isolamento imperfeito.

A primeira destas melhorias pode ser conseguida pela redução do excesso de ar de combustão e pelo aumento do coeficiente de transmissão de calor entre a chama e a superfície do corpo a ser aquecido.

Este incremento permite aos gases queimados uma temperatura de saída a mais próxima possível daquela da fonte fria e assim elevar o rendimento térmico para valores máximos possíveis.

O coeficiente de transmissão de calor global numa fornalha depende do coeficiente de irradiação que varia com o cubo da temperatura absoluta da chama e do coeficiente de convecção forçada que é relativamente independente da temperatura de chama e proporcional à velocidade do gás.

Para uma fornalha cilíndrica pode-se tirar o coeficiente de transmissão de calor para convecção da expressão:

$$h_c = \frac{0,020 d^{0,2} K}{\sqrt[3]{0,8} \sqrt[3]{0,8}}$$

onde:

- d - diâmetro em metros
- K - condutividade térmica dos gases kcal/mh<sup>0</sup>k
- $\sqrt[3]{\phantom{x}}$  - viscosidade cinemática dos gases m<sup>2</sup>/h
- $\sqrt[3]{\phantom{x}}$  - velocidade dos gases m/h

Segundo THRING, para uma velocidade de corrente dos gases de cerca 30 m/s, com uma temperatura de 1000<sup>0</sup>C e com uma câmara de 2m de diâmetro, o máximo valor de  $h_c$  será da ordem de 25 kcal/m<sup>2</sup>h<sup>0</sup>K.

Para o cálculo do coeficiente de irradiação h<sub>irr</sub> em condições análogas, emprega-se a seguinte relação:

$$h_{irr} = \frac{\sigma \epsilon (T_f^4 - T_p^4)}{T_f - T_p}$$

onde:

- $\sigma$  - constante de Stefan Boltzman 4,9 10<sup>-8</sup> kcal/m<sup>2</sup>h<sup>0</sup>K<sup>4</sup>
- $\epsilon$  - Emissividade global relativa da chama
- T<sub>f</sub> - temperatura da chama <sup>0</sup>K
- T<sub>p</sub> - temperatura das paredes <sup>0</sup>K

Se considerarmos o fator  $\epsilon$  para a chama praticamente igual à unidade (corpo quasi negro) o coeficiente para irradiação pode chegar p/ T<sub>f</sub> - 1500<sup>0</sup>C T<sub>p</sub> - 900<sup>0</sup>C  
A valores da ordem de 650 kcal/m<sup>2</sup>h<sup>0</sup>K

Os valores sensivelmente diferentes dos dois coeficientes indicam como a transmissão de calor, nas temperaturas do exemplo se dê essencialmente por irradiação (mesmo que a chama irradie 10% menos do que o corpo negro).

Isto posto conclue-se que o meio mais importante para aumentar a eficiência de uma câmara de combustão é o de melhorar o mais possível a emissibilidade dos gases queimados, por exemplo, por aumento da temperatura.

A temperatura  $T_f$  da chama, cuja influência é particularmente grande é difícil de ser determinada, pois mesmo em operação em regime permanente, nos diferentes pontos da fornalha, há temperaturas muito diferentes.

Em caldeiras clássicas normais, por exemplo, para uma temperatura de saída dos gases de  $T_{II} = 1500^\circ\text{K}$ , podem haver picos de temperaturas de  $1800^\circ\text{K}$ . A intensidade local de irradiação

$$q = \left( \frac{1800}{1500} \right)^4 q_{II} = 2,1 q_{II}$$

Pode pois ser 2,1 vezes maior do que a correspondente à temperatura de saída dos gases.

A temperatura de saída dos gases da câmara de combustão não é pois sem mais, apropriada para o cálculo da transmissão de calor. Por outro lado a determinação de uma temperatura efetiva  $T_f$  é difícil pois a variação da temperatura na chama não é conhecida.

O cálculo de transmissão de calor por irradiação, com o auxílio das leis da irradiação, portanto, é bastante complicado e a precisão é dependente de muitas admissões simplificativas e de valores práticos.

Para cálculos aproximados empregam-se frequentemente fórmulas empíricas simples, que foram montadas baseadas na fórmula de HUDSON-ORROK.



De acôrdo com essa fórmula é determinada a parte de calor absorvido pela irradiação com relação à toda energia liberada na fornalha, inclusive a energia do ar de combustão ( $J_o$ ).

$$\mu = \frac{Q_{irr}}{J_o} = \frac{1}{1 + \frac{L}{55,24} \sqrt{B}}$$

$L$  = Vazão específica do ar em kg ar/kg combustível

$B$  = Vazão específica de combustível em  $\text{kg/m}^2$  de superfície efetiva de irradiação.

A fórmula de ORROK foi provada em inúmeras caldeiras, principalmente queimando carvão.

Depois de trabalhos e medidas mais modernas, essa fórmula foi variadamente alterada, da seguinte forma:

HOTTEL

$$\mu = \frac{L}{1 + 1645 \frac{\sqrt{J_o / F_p}}{t_o^{1,82}}}$$

$t_o$  = Temperatura teórica de combustão

$F_p$  = Área da superfície de troca de calor =  $E \psi_o$

REID COHEN e COREY dão:

$$\mu = \frac{100}{1 + \frac{1000 G_r}{J_o} \sqrt{\frac{J_o}{1000 F_p}}} \cdot C$$

$F_p$  - Área da superfície projetada ( $\text{m}^2$ )

$G_r$  - Vazão mássica dos gases de combustão em kg/h

$C$  - Constante que depende do sujamento das superfícies e



De acôrdo com essa fórmula é determinada a parte de calor absorvido pela irradiação com relação à toda energia liberada na fornalha, inclusive a energia do ar de combustão ( $J_o$ ).

$$\mu = \frac{Q_{irr}}{J_o} = \frac{1}{1 + \frac{L}{55,24} \sqrt{B}}$$

$L$  = Vazão específica do ar em kg ar/kg combustível

$B$  = Vazão específica de combustível em  $\text{kg/m}^2$  de superfície efetiva de irradiação.

A fórmula de ORROK foi provada em inúmeras caldeiras, principalmente queimando carvão.

Depois de trabalhos e medidas mais modernas, essa fórmula foi variadamente alterada, da seguinte forma:

HOTTEL

$$\mu = \frac{L}{1 + 1645 \frac{\sqrt{J_o / F_p}}{t_o^{1,82}}}$$

$t_o$  = Temperatura teórica de combustão

$F_p$  = Área da superfície de troca de calor =  $E \psi o$

REID COHEN e COREY dão:

$$\mu = \frac{100}{1 + \frac{1000 G_r}{J_o} \sqrt{\frac{J_o}{1000 F_p}}} \cdot C$$

$F_p$  - Área da superfície projetada ( $\text{m}^2$ )

$G_r$  - Vazão mássica dos gases de combustão em kg/h

$C$  - Constante que depende do sujamento das superfícies e varia entre 0.0387 e 0.0442

## 2.3 PERDAS E RENDIMENTOS DA COMBUSTÃO

### 2.3.1 Generalidades

Quando se projetam instalações individuais de combustão, após escolhido o combustível mais conveniente e verificado qual o equipamento de combustão mais apropriado, em se tratando da finalidade de transmitir calor, procura-se conseguir, em volume mínimo a área de troca de calor mínima, o máximo rendimento.

Por rendimento térmico da chama, numa fornalha, entende-se a relação entre calor absorvido pelo material ou fluído a aquecer ou transformado em energia liberada durante a combustão, normalmente considerada a entalpia da combustão.

Esta relação pode ser aumentada, diminuindo o calor transportado para fora do sistema, pelos produtos de combustão, ou reduzindo a perda dispersada para o exterior pelas paredes do equipamento e instalação, ou ainda, reduzindo a porcentagem de combustível não ou mal queimado, que dependem da operação:

- perdas por parada ou partida
- perdas por mudança de marcha ou carga
- perda por descarga de fundo

### 2.3.2 Perdas

As perdas em regime permanente de operação de um sistema, cuja fonte de energia é um combustível, são divididas basicamente em três grandes grupos a saber:

#### 2.3.2.1 Perdas por combustível não queimado

Resultam do fato que o combustível ou deixa o queimador prematuramente, ou o mesmo não lhe permite uma permanência suficientemente longa, a fim de haver combustão completa. Além

disso, essas perdas podem ser causadas pela mistura imperfeita do combustível e do ar.

As perdas neste caso serão a combustão incompleta dos gases formados e o combustível nas cinzas e coque volante.

A primeira perda citada (combustão incompleta dos gases formados) surge devido à existência de CO e H<sub>2</sub> nos gases, à saída do gerador de vapor. O poder calorífico de CO é 3040 kcal/m<sup>3</sup>n e do H<sub>2</sub> é 2570 kcal/m<sup>3</sup>n. Sendo % (CO) a proporção em volume desse gás, medida nos gases, à saída do gerador, por meio da análise de Orsat, em m<sup>3</sup>n/m<sup>3</sup>n, teremos para cada kg de combustível queimado um volume de CO dado por  $(1 - v'u)$ , % (CO)  $V'_g$  em m<sup>3</sup>n/kg.

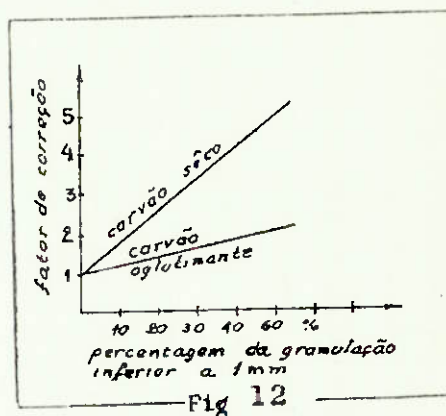
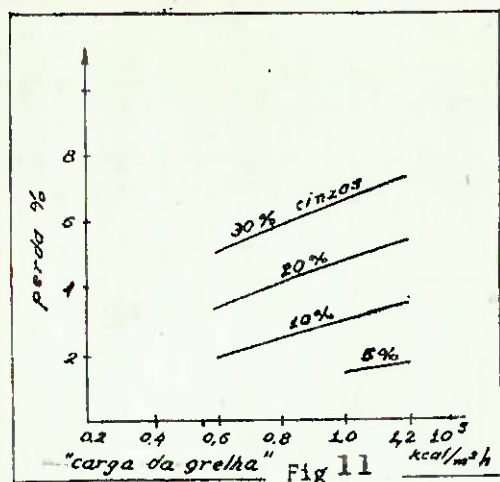
A perda devida ao CO nos gases, relacionada ao poder calorífico inferior do combustível será:

$$v_{CO} = \frac{\% (CO) \cdot V'_g \cdot 3040 (1 - v'u)}{pci}$$

E, analogamente, a perda para H<sub>2</sub> nos gases

$$v_{H_2} = \frac{\% (H_2) \cdot V'_g \cdot 2570 (1 - v'u)}{pci}$$

A perda por combustível nas cinzas  $V_z$  é dada pela fig. 11 em função da "carga". Havendo no carvão uma percentagem elevada, cuja granulação abaixo de 1 mm seja apreciável, o resultado da fig. 11 deverá ser corrigido com o fator dado pela fig. 12.



A perda por coque volante  $V_C$  depende da carga da fornalha, da finura da moagem e do conteúdo de cinzas, embora, em casos normais, permaneça pequena.

Chamando a perda total por combustível não queimado por  $V_u$ , segue portanto que:

$$V_u = V_{CO} + V_{H_2} + V_z + V_C$$

O valor de  $V_u$  pode ser considerado, na prática da ordem de 2 a 4%, valendo o valor menor para fornos de escória fundida (piscina). Por outro lado, como a combustão se processa com quantidade de ar bem acima da estequiométrica,  $V_{CO}$  e  $V_{H_2}$  tornam-se desprezíveis

Assim:  $V_u \sim V_z$

#### 2.3.2.2 Perdas por Irradiação, Condução e Convecção

Estas perdas surgem da existência de uma diferença de temperatura entre o revestimento do queimador que poderá ser de alvenaria, massa isolante e chapa de aço e à temperatura ambiente. Deseja-se às vezes, que estas assumam valores elevados com a finalidade de pré-aquecer o ar de alimentação. Chamá-la-emos por  $V_{aq}$ .

### 2.3.2.3 Perdas por Entalpia dos Gases na chaminé e no queimador

As perdas na chaminé ( $V_h'$ ) são normalmente as maiores num forno. A origem dessas perdas é a temperatura mais elevada do que a do ambiente, com que os gases resultantes da combustão deixam o forno. Para perdas no queimador ( $V_h$ ), a origem é a diferença de temperatura entre reagentes e produtos. As expressões de ambas são no entanto semelhantes, portanto o que for dito para  $V_h'$  vale também para  $V_h$ .

Em relação ao pci do combustível queimado poderemos exprimir essas perdas, em porcentagem, com a seguinte expressão:

$$V_h' = \frac{(1 - v'u) (hg - ha)}{\text{pci}} \cdot 100$$

hg - Entalpia dos gases na saída do forno por kg de combustível queimado.

ha - Entalpia do ar na temperatura ambiente por kg de combustível.

$(1 - v'u)$  - É um fator que considera as perdas no queimador pois, a porcentagem  $v'u$  do combustível não queimado não forma também gases de combustão.

$$hg = c_{p_g} \cdot V_g \cdot \theta_g$$

$$ha = c_{p_a} \cdot V_{ar} \cdot \theta_a$$

Podemos assim imediatamente verificar que essa perda depende:

- Da temperatura dos gases na saída
- Do coeficiente de excesso de ar

Se adotamos na expressão de  $V_h$  os valores aproximados de  $C_{p_g} \cdot V_g = C_{p_a} \cdot V_{ar}$ , fazendo  $V_{ar} = V_{ar}^0 m$ , sendo  $V_{ar}^0$  proporcional ao pci do combustível c, considerando ainda que

$$m = \frac{\% (CO_2)_{\text{máx}}}{\% (CO_2)}$$

$$V_h' = \frac{K (\theta_g - \theta_a)}{\% (CO_2)}$$



No fator K estão agrupados os valores pouco variáveis e as suposições simplificativas corrigidas.

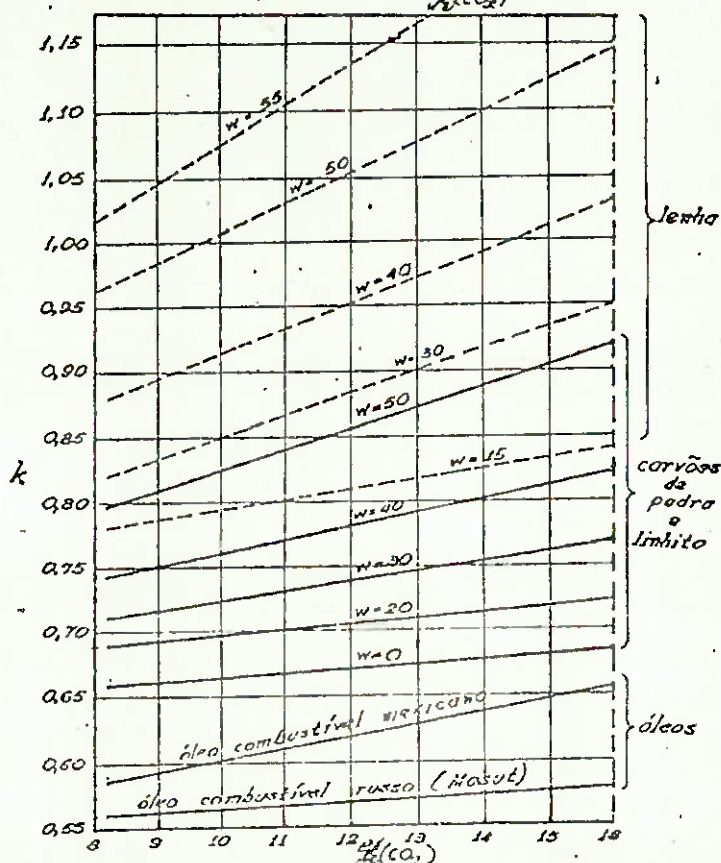
A última expressão para  $V_h$  representa a fórmula de Siegert, muito empregada para cálculos rápidos aproximados de  $V_h$ .

Essa fórmula, sob a forma de ábaco pode ser encontrada na fig. 13

Perdas nos gases à saída de acordo com a fórmula de Siegert.

- Para carvão, lenha e combustíveis líquidos  $V_h = k \frac{\theta_g - \theta_a}{\mu(CO_2)}$

- Para lignito  $V_h = 1,1 k \frac{\theta_g - \theta_a}{\mu(CO_2)}$



w — conteúdo de água no combustível em %

$\theta_a$  e  $\theta_g$  — temperaturas em °C

$\mu(CO_2)$  — % em volume, em  $Nm^3/Nm^3$

$V_h$  — resultado em kcal/kcal

FIGURA 13

### 2.3.3 Rendimento da Combustão

Pelo que foi exposto nos itens anteriores, é fácil concluir que, em regime permanente, o rendimento térmico global de um equipamento que emprega combustível como fonte de energia é:

$$\eta = 1 - \sum \text{Perdas} \quad , \quad \text{onde: } \sum \text{Perdas} = V_u + V_{aq} + V_h$$

e  $\eta = \mu$

Sendo as perdas dadas em porcentagem de pci, e o rendimento referido ao mesmo pci.

De todas as perdas citadas, a única que efetivamente depende do equipamento de combustão (queimador) é a perda por combustível não queimado, sendo as demais dependentes dos aspectos construtivos dos queimadores.

### 2.4 Forma e dimensões da chama

A forma e dimensões da chama são ligadas ao queimador, podendo ser influenciadas pelas condições de projeto e variáveis de operação.

No que diz respeito ao projeto, uma boa mistura obtida por turbulência e elevadas velocidades dos componentes da mistura, dão ensejo, para a mesma potência empregada a chama curta e intensa, enquanto que a mistura incompleta e baixas velocidades dão ensejo a chamas compridas e moles.

Quanto às condições de operação, efeito muito sensível pode ser obtidos, por meio de excesso de ar. Em igualdade de outras condições o aumento do excesso de ar tende a encurtar a chama, enquanto que uma redução tende a alongá-la.

Pode-se ainda ter chama curta e intensa para pequenos excessos de ar com elevada turbulência, elevada temperatura de ar ou recirculação parcial dos produtos de combustão.

A variação da pressão do ar modifica a forma da chama.

Um

aumento de pressão tende a encurtar a chama. Os sistemas para aumentar a mistura ar-combustível são geralmente compostos de defletores fixados nos dutos de ar e no próprio queimador de modo a provocar o movimento rotativo do ar também.

As figuras 14 e 15 apresentam comprimentos das chamas em condições normais de operação, sem ar pré-aquecido. Para este último entende-se por comprimento desejado recomendado pelo fabricante do queimador para dimensionar a fornalha.

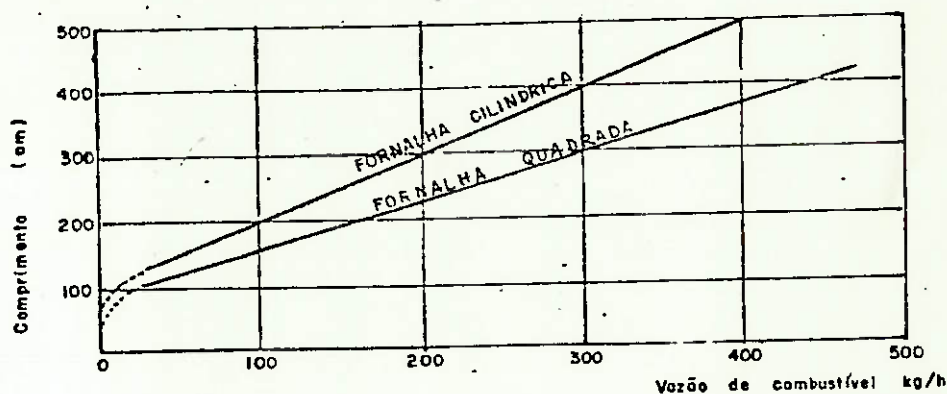


Figura 14

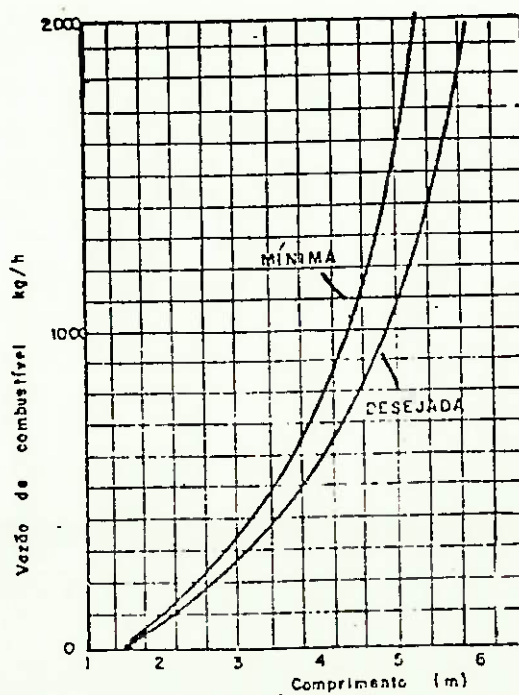


Figura 15

Na prática, para queimadores do tipo ciclônico, utiliza-se também as relações empíricas, abaixo adotadas pela Babcock e Wilcox:

$$L = 1,3 D \quad \text{e} \quad \frac{\dot{Q}}{V} \quad (16 \text{ a } 25) \quad \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}}$$

onde:

L - comprimento do queimador

D - diâmetro do queimador

V - volume do queimador

$\dot{Q}$  - geração de calor

## 2.5 Pré-aquecimento do ar de combustão

Dados os valores elevados da temperatura de ignição de vários combustíveis, não é possível, na prática, pré-aquecer a mistura ar-combustível até esse valor por razões de custo e para evitar o perigo de pré-acendimento ou pré-ignição.

É contudo conveniente, para aumentar a estabilidade da chama, pré-aquecer o ar à temperatura de 200 até 300 °C.

Nos queimadores que têm fluxos separados de ar combustível o pré-aquecimento é somente do ar.

Em certos fornos, principalmente os que operam a elevada temperatura, e têm portanto produtos de combustão à saída, de elevada entalpia, aproveita-se para preaquecer o ar de combustão por meio de trocadores de calor alcançando as temperaturas até de 500°C.

Deve-se ainda destacar que os queimadores, para funcionar nesse regime de temperatura, devem ter particularidades construtivas específicas.