

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE FORMATURA

7,5 (sete e meio)
8,1. →

QUEIMADOR CICLÔNICO PARA CARVÃO PULVERIZADO

VOLUME II

Autor : SILVAL OLIVETTI
Orientador: EURYALE J. ZERBINI

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 com bustíveis 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 à partir do item 2.6. (Isolamento Térmico do Queimador) até a conclusão do projeto, com a sua aplicação prática.

A parte inicial é encontrada no volume I de mesmo título, apresentado como Trabalho de Formatura do mesmo ano de autoria de Ruy Fernandes Torres.

Para o cálculo do isolamento térmico do queimador, utilizaremos os modelos matemáticos consagrados da transmissão de calor, quais sejam:

Convecção:

$$a) \quad \dot{Q}_c = \bar{h}_c \cdot A \cdot \Delta t$$

$$b) \quad \bar{h}_c = \frac{\bar{N}_u \cdot K}{L_t}$$

$$c) \quad \bar{N}_u = 0,023 \cdot \left[1 + \left(\frac{Dh}{L} \right)^{0,7} \right] \cdot Re_d^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \quad \begin{matrix} \text{(p/dutos} \\ \text{curtos e} \\ Re_d > 6000 \end{matrix}$$

$$d) \quad Re_d = \frac{\rho \cdot V \cdot Dh}{\mu}$$

onde:

$\dot{Q}_c$ = calor transmitido por convecção em kcal/h

h_c = coeficiente médio de convecção em kcal/h m² °C

A = área da superfície perpendicular ao fluxo de calor em m².

Δt = diferença de temperatura entre o fluido e a parede

$\bar{N}_u$ = número Nussef

K = condutividade térmica do fluido em kcal/h m °C

L_t = comprimento do duto pelo qual o fluido escoar em m

Dh = diâmetro hidráulico em m

Re_d = número de Reynolds relativo ao diâmetro hidráulico

Pr = número de Prandtl do fluido

ρ = densidade do fluido em kg/m^3

V = velocidade de escoamento do fluido em m/s

μ = viscosidade dinâmica do fluido em kgf s/m^2

Devemos observar que as propriedades relativas ao fluido devem ser dadas na temperatura média do mesmo, qual seja:

$$t_b = \frac{t_e + t_s}{2}$$

onde:

t_b = temperatura média do fluido

t_e = temperatura de entrada no trocador de calor

t_s = temperatura de saída do trocador de calor

Condução:

$$a) \quad \dot{Q}_k = \frac{\Delta t}{\ln (d_e/d_i)} \cdot 2 \cdot k \cdot l$$

onde:

$\dot{Q}_k$ = calor transmitido por condução em kcal/h

Δt = diferença de temperatura entre as superfícies interna e externa em $^{\circ}\text{C}$

D_e = diâmetro externo da superfície em m

k = condutividade térmica do material da superfície em $\text{kcal/h m}^{\circ}\text{C}$

l = comprimento da superfície em m

2.7

PREPARAÇÃO DO CARVÃO

Nas fornalhas de queima de carvão em pó o combustível é soprado na câmara de combustão no estado moído.

O tempo de residência da maior parte das partículas de carvão na câmara de combustão deve ser, no mínimo, da ordem do tempo de combustão. Considerando que o tamanho dos grãos é muito variado não é econômico dimensionar a fornalha pelos tamanhos maiores. Deve ser por isso, sempre, considerada - uma perda por combustível não queimado.

A granulometria é definida pelas malhas das peneiras. Na tabela 04 são apresentadas as peneiras de acordo com a Norma DIN 4188.

TABELA 04

defin. da peneira = larg. livre da malha em mm	Nº antigo da peneira	num. de malhas M/cm ²	diâm. do fio em mm
0,3	20	400	0,2
0,2	30	900	0,13
0,15	40	1.600	0,10
0,12	50	2.000	0,080
0,10	60	3.600	0,065
0,09	70	4.900	0,055
0,075	80	6.400	0,050
0,06	100	10.000	0,040

A distribuição da granulometria pode ser descrita pela expressão de ROSIN e RAMMLER:

$$R = 100 \exp \left[- \frac{(d)^n}{dm} \right]$$

Sendo R o resíduo em peso e % para a malha livre d . O tamanho médio do grão é dm , e n uma constante que significa a "uniformidade". Quanto menor fôr dm tanto mais fina será a moagem e quanto maior n mais uniforme a mistura de grãos, ou seja, há uma porcentagem fixa de peso contida sempre numa cada vez menor faixa de diâmetros.

Colocando em gráfico, tendo em ordenadas $\log \left[\frac{(100)}{R} \right]$ e em abcissas $\log d$ aparecerá um segmento de reta chamado de ROSIN-RAMMLER.

Na prática é normalmente suficiente que a figura da moagem seja definida pelos resíduos em duas peneiras, por exemplo 0,2 e 0,09.

A tabela 05 mostra valores usuais, para fornos com extração de escoria seca.

TABELA 05

Resíduos necessários para escorias retiradas secas

	Carvão mineral % de gás			linhito % de gás		
	4	25	45	45	53	60
Resíduo na peneira 0,2	2	3	6	10	15	25
Resíduo na peneira 0,09	7	18	35	45	50	60

A finura da moagem contudo é influenciada fortemente pelo tipo de fornalha.

Para fornalhas com escória fundida, pode o resíduo da peneira 0,09 ser 1,3 vezes maior do que o da tabela 05. Para fornalhas ciclone, verticais e horizontais, cerca de 1.8 e 3.0 vezes respectivamente.

A moagem do carvão é feita em moinhos. O pó é retirado dos

mesmos por um fluxo de ar e pode ser insuflado diretamente na câmara de combustão ou primeiramente estocado para ser depois insuflado.

Antes da moagem ou durante a mesma, o carvão precisa ser secado quando o teor de umidade for elevado, o que pode ser feito em secadores separados a vapor ou com gases de combustão ou no próprio moinho. Neste último processo a secagem pode ser feita por ar aquecido, ou por gases aspirados de volta da fornalha.

As razões para escolha de uma fornalha de carvão pulverizado ao invés de com grelha são:

- Possibilidade de manutenção de elevado teor de CO₂ e com isso economia de combustível
- Melhor combustão para elevado teor de cinzas.
- Reduzida perda por coque volante.
- Melhores possibilidades de regulagem.
- Menor espaço ocupado para capacidades grandes.
- Maior programa de variação de combustíveis.
- Exequível para grandes capacidades.

Contra essa escolha podem ser anotados:

- Potência instalada nos moinhos 5 até 25 kw por tonelada de carvão. Esta propriedade compromete frequentemente a economia de combustível
- Desgaste dos moinhos.
- Limitação para baixo, pois abaixo de 30% de carga total não é mais possível obter uma ignição satisfatória.
- Para instalações de pequeno porte, maior manutenção.
- Maior perda por cinzas volantes.

2.7.1 Moinhos de carvão em pó

Os moinhos de carvão são divididos em:

- moinhos por gravidade ou de bolas, de martelo, de mola, centrífugos, de choque.

2.7.1.1 Moinhos de bolas

Vide figura 17. O maior representante dessa classe é o moinho rotativo, cilíndrico, com carregamento até um terço de seu volume de esferas de aço de diversos tamanhos, com uma rotação da ordem de 30 rpm.

Kohlenstaubfeuerungen

Abb. 73. Rohrmühle mit Griefschalter und Griefstückführung

1 Rohrtrommel; 2 Stirnwand an der Einlaufseite; 3 Stirnwand an der Auslaufseite; 4 Festlager; 6 Loslager; 6 Zahnkranz; 7 Schutzkasten zum Zahnkranz; 8 Ritzel; 9, 10 Panzerplatten zur Trommel; 11 Panzerplatten zur Stirnwand; 12 Panzerplatten zum Stirnwandhals; 13 Senkkopfschraube zur Trommel; 14 Senkkopfschraube zur Stirnwand; 15 Senkkopfschraube zum Stirnwandhals; 16 Einlaufgehäuse; 17 Einlauftrinne; 18 Schleifbohr im Hals des Festlagers; 19 Schleifbohr im Hals des Loslagers; 20 Schleifkrümmer am Austritt; 21 Steigleitung; 22 Prallkegel am Hals der Stirnwand; 23 Schleifer-Unterteil; 24 Schleifer-Oberteil; 25 Prallkegel zum Schleifer; 26 Griefdruckaufschneckenring; 27 Schneckenwelle; 28 Loslager zur Schnecke; 29 Festlager zur Schnecke; 30 Mittelager zur Schnecke; 31 Griefdruckaufschnecke; 32 Kettenrad; 33 Kettenrader; 34 Zahnkranz am Halszapfen; 35 Vorgelegelagerung; 36 Getriebe; 37 Fundamentrahmen zum Einlaufgehäuse und Lager; 38 Fundamentrahmen zum Lager und Krümmer; 39 Fundamentrahmen zum Vorgelege und Zwischenwelle; 41 Fundamentrahmen zum Zahnkranzschutzkasten; 42 Kupplung zwischen Motor und Zwischenwelle; 43 Kupplung zwischen Getriebe und Vorgelege; 44 Kupplung zwischen Getriebe und Zwischenwelle; 45 Zwischenwelle zwischen Motor und Getriebe; 46 Lager zur Zwischenwelle; 47 Isolation der Rohrtrommel; 48 Isolation der Stirnwand (Einlauf); 50 Isolation der Stirnwand (Auslauf)

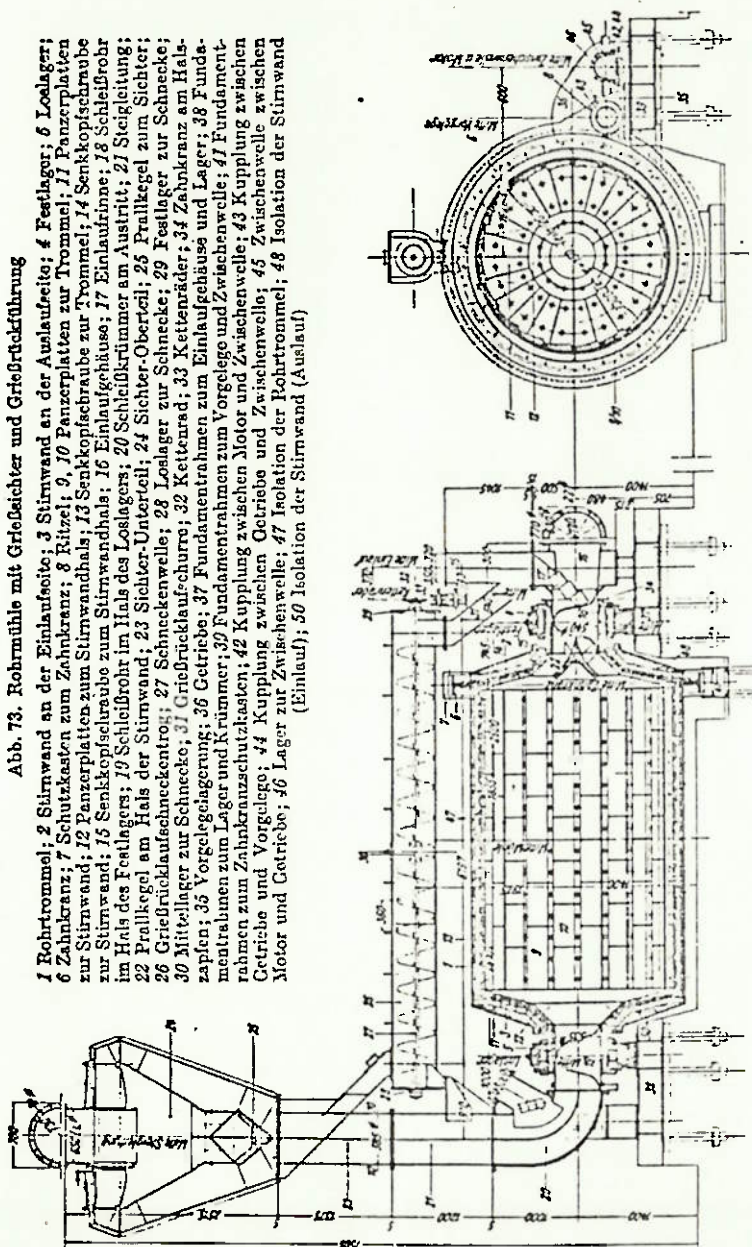
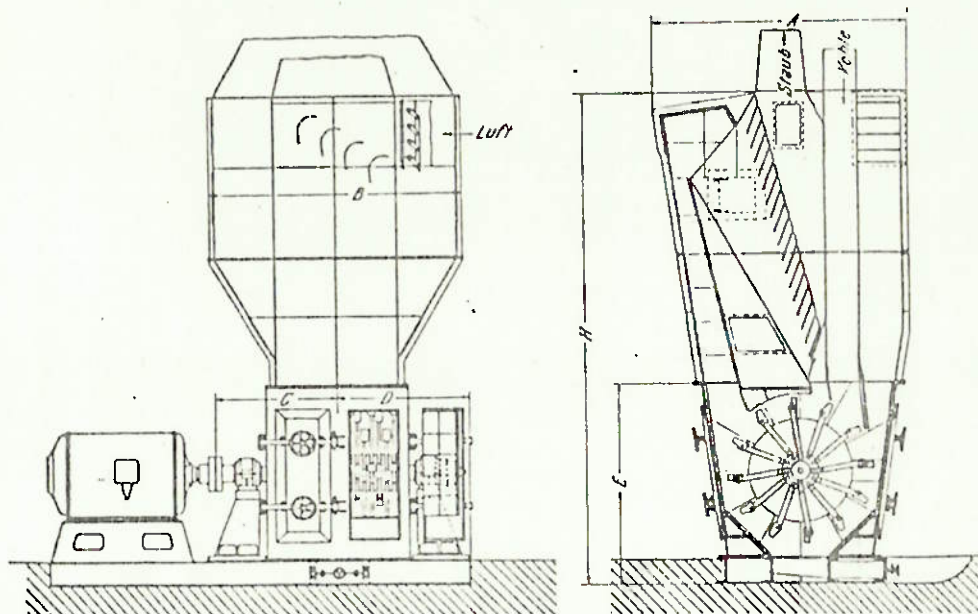


Fig 17

2.7.1.2 Moinho de martelo

Vide figura 18. Neste moinho a redução dos pedaços da carga se dá principalmente pelo choque do carvão que entra radialmente com uma velocidade de 50 a 90 m/seg em chapa ou cabeceira.

No moinho dessa figura os martelos são fixados no rotor com articulação girando de 750 a 1.500 rpm.



Schlägermühle mit Grobsichter und tangentieller Luftzufuhr (Steinmüller, Gummersbach)

FIGURA 18

A adição de ar quente para secar e classificar o carvão é tangencial. Do outro lado do moinho, o produto moído é arremessado, e através de outro classificador levado ao queimador.

2.7.1.3 Moinhos H-S

Se o classificador do moinho anterior for executado na forma de ciclone, tem-se o moinho H-S da Babcock, fig. 19 , que é empregado para carvão de pedra e linhito.

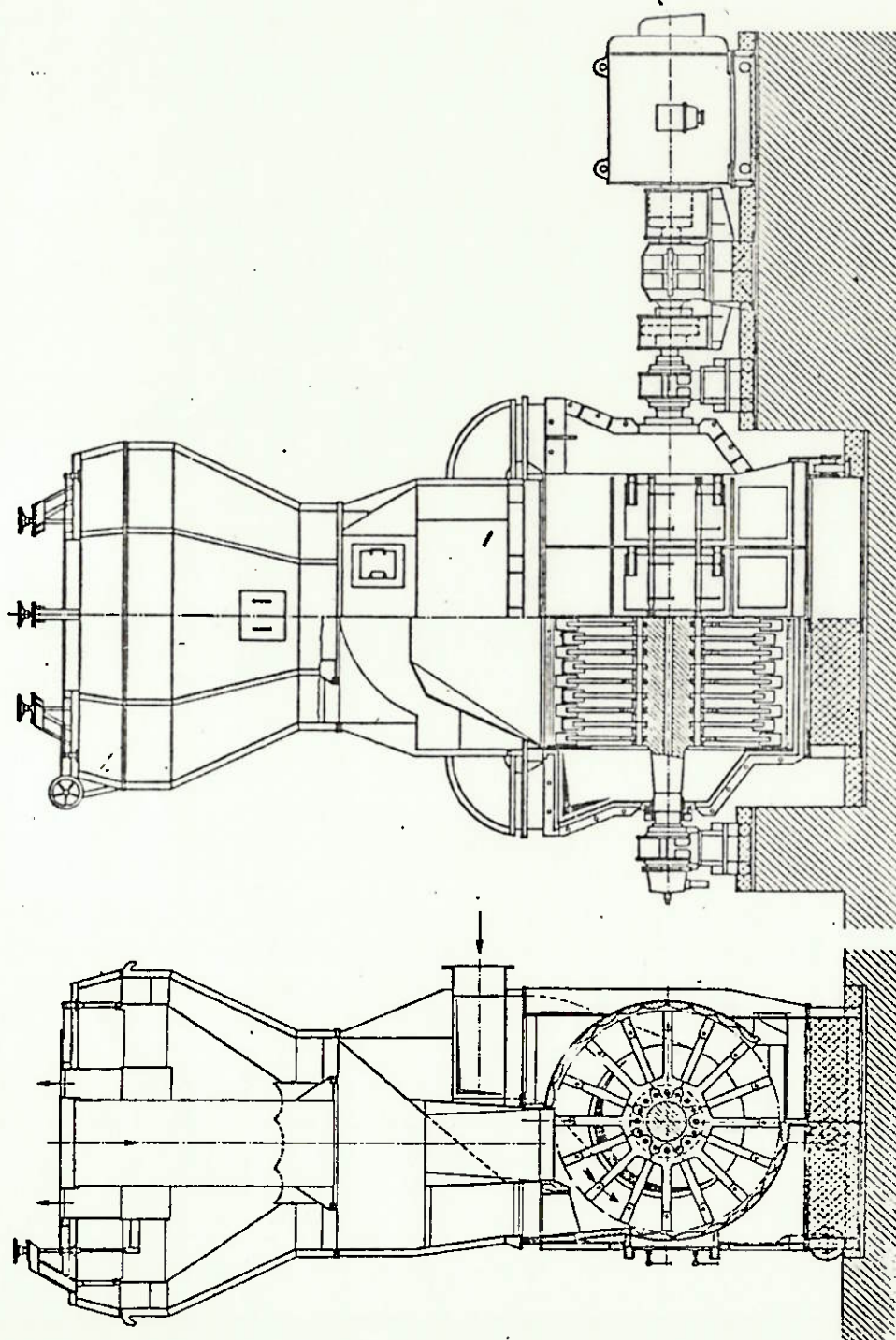


Fig 19

Trata-se do moinho DSG da Babcock que gera à sua saída uma sobre pressão relativamente à entrada, ou seja tem a ação de ventilador.

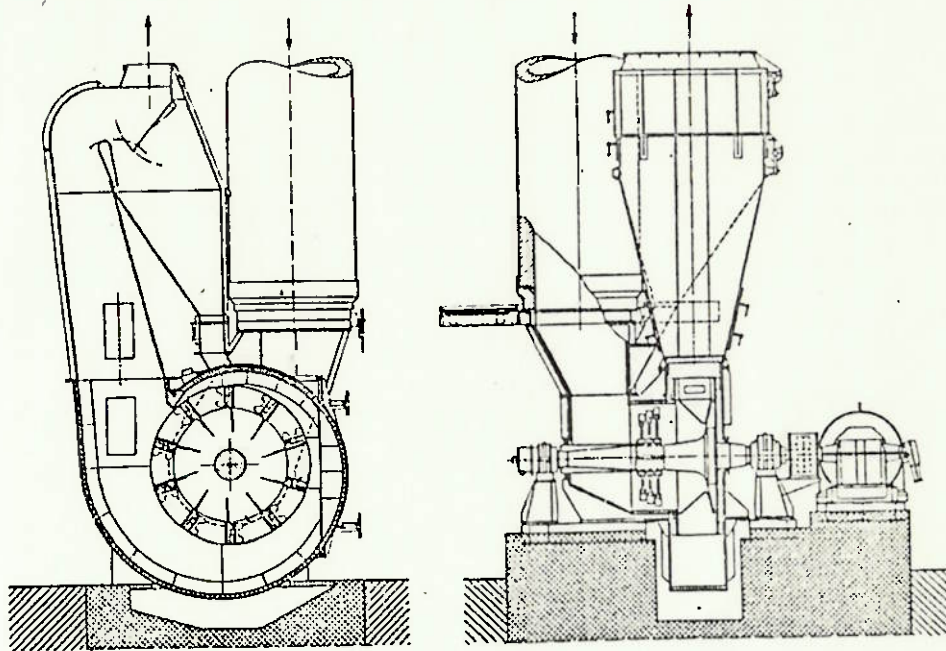


FIGURA 20

Nestes moinhos os martelos são substituídos por um motor do tipo de ventilador com placas de choque trocáveis. Na parte superior do moinho há um classificador de modo a tornar a finura da moagem regulável (fig. 21).

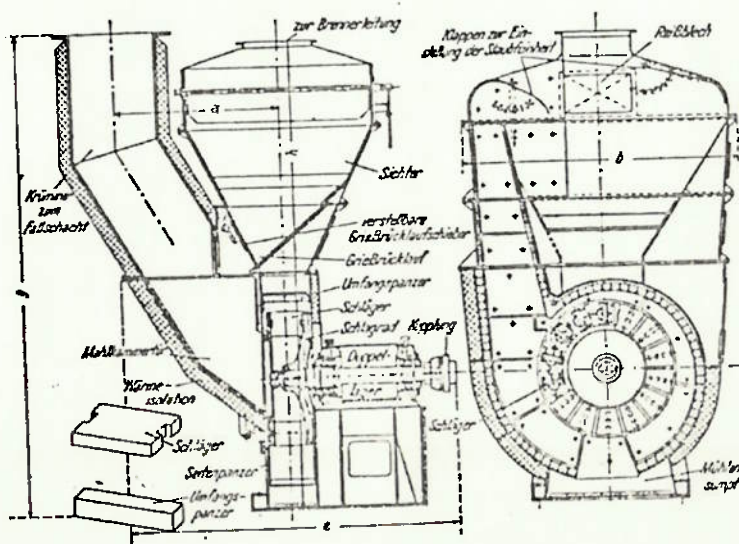


FIGURA 21

2.7.1.5 Moinhos de mola

Nestes moinhos a moagem se dá entre duas superfícies rolando uma sobre a outra e entre si prensadas por força de molas . Vide figura 22.

Neste moinho o prato horizontal gira com uma velocidade de 3 m/seg.

Na sua parte superior há um classificador.

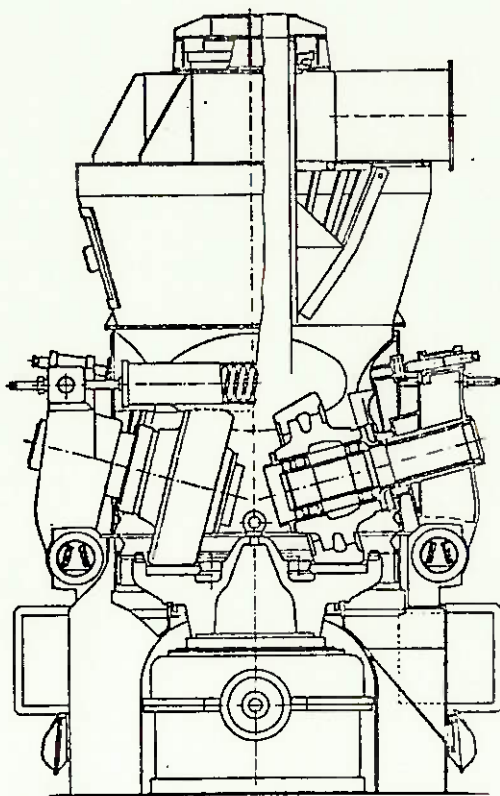


FIGURA 22

2.7.1.6 Moinhos centrífugos

Nestes moinhos, uma coroa de esferas girantes, com ajudas de molas, prensadas contra a pista de moagem, causa a redução - de tamanho dos pedaços de carvão.

2.7.1.7 Moinhos de choque

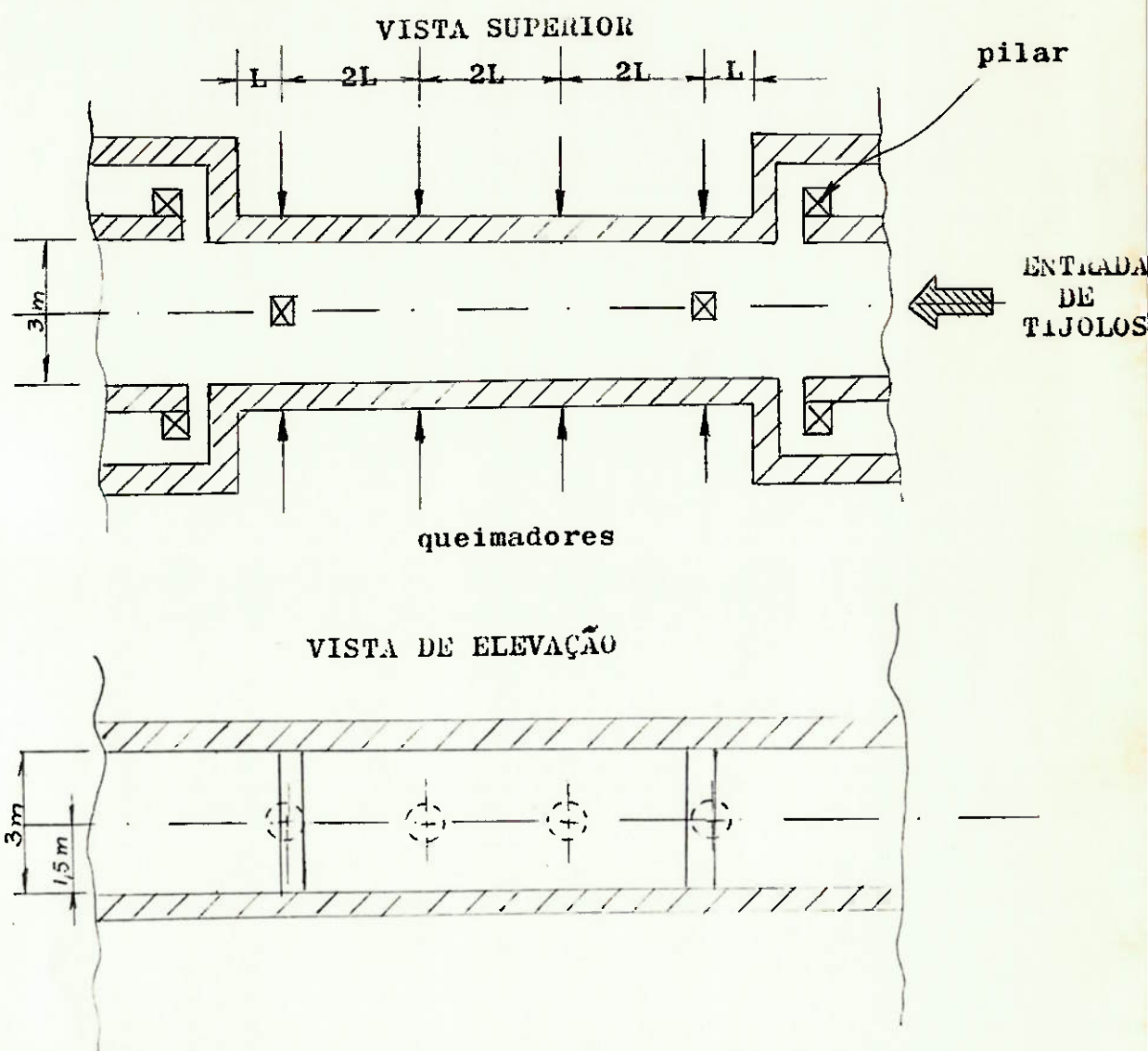
Nestes moinhos o carvão é atirado contra uma placa por jato de ar a alta velocidade.

3.

APLICAÇÃO PRÁTICA

Dimensionamento de um queimador ciclônico para carvão pulverizado.

A empresa CERÂMICA IRAPUÁ LTDA., pretende substituir seus fornos a óleo combustível por um forno único do tipo túnel, conforme o esquema abaixo.



O forno deverá ter capacidade para $2 \cdot 10^6 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$ distribuída em 8 queimadores ciclônicos posicionados ao longo da zona de queima do forno.

O combustível a ser utilizado deverá ser carvão mineral pulverizado, procedente da mina de Charqueadas (RS), conforme

contrato firmado entre a empresa e a C.A.E.E.B. (Cia. Auxiliar de Energia e Eletricidade Brasileira).

3.1 Vazão de Combustível

Sendo: Q = capacidade projetada do forno

Q' = capacidade útil do forno

$\dot{m}_t$ = vazão em massa de carvão

PCI = poder calorífico inferior do carvão

Sabendo que:

$$Q = \dot{m}_t \cdot PCI$$

$$Q = \frac{Q'}{\mu} \text{ onde } \mu \text{ é o rendimento do forno}$$

e tendo:

$$Q' = 2 \cdot 10^6 \text{ kcal/h}$$

$$PCI = 5045 \text{ kcal/kgcomb (Carvão de Charqueadas, tab.01)}$$

$$\mu = 80\% \text{ (estimado, sujeito a reiteração).}$$

Segue que:

$$Q = \frac{Q'}{\mu} \longrightarrow Q = \frac{2 \cdot 10^6}{0,8} \longrightarrow \boxed{Q = 2,5 \cdot 10^6 \text{ kcal/h}}$$

$$Q = \dot{m}_t \cdot PCI \longrightarrow \dot{m}_t = \frac{Q}{PCI} \quad \dot{m}_t = \frac{2,5 \cdot 10^6}{5045}$$

$$\boxed{\dot{m}_t = 496,0 \text{ kg/h}}$$

Como temos 8 queimadores, corresponderá a cada um, a vazão:

$$\dot{m}_1 = 61,9 \text{ kg/h}$$

A partir, deste ponto, seguiremos o raciocínio referindo-nos a apenas um queimador, pois pretendemos que todos os oito sejam iguais (mesmas dimensões e mesma produção).

3.2 Vazão de ar necessária

Segundo o item 2.1.3.1 , pág. 13 , vem

$$a) \quad V_{ar}^0 = 8,977c + 26,443h + 3,66s + 3,332o$$

$$b) \quad L_{ar}^0 = V_{ar}^0 \cdot 1,2928$$

$$c) \quad L_{ar} = L_{ar}^0 \cdot M_{comb.}$$

O carvão de Charqueadas apresenta a seguinte análise elementar (vide Tabela 01, pág. 11):

c	-	52,3%
h	-	3,7%
n	-	0,9%
o	-	10,1%
s	-	0,5%
w	-	11,6%

$$V_{ar}^0 = 8,977 \cdot 0,523 + 26,443 \cdot 0,037 + 3,66 \cdot 0,005 + 3,332 \cdot 0,101$$

$$V_{ar}^0 = 6,03 \text{ m}_n^3 \text{ ar/kgcomb.}$$

$$L_{ar}^0 = 6,03 \cdot 1,2928 \longrightarrow L_{ar}^0 = 7,79 \text{ kg/kgcomb}$$

Utilizando-se um excesso de ar de 20%, vem:

$$L_{ar} = 7,79 \cdot 1,20 \longrightarrow L_{ar} = 9,35 \text{ kg/kgcomb.}$$

Assim:

$$L_{tl}^0 = L_{ar}^0 \dot{M}_{comb} \longrightarrow L_{tl}^0 = 9,35 \cdot 61,9 \longrightarrow$$

$$\longrightarrow \boxed{L_{tl}^0 = 578,88 \text{ kgar/h}}$$

3.3

Vazão dos gases produzidos na combustão

Segundo o item 2.1.3.2., pág. 16 , segue:

$$a) \quad V_g^0 = 1,8535c + 0,683s + 0,8n + 0,79V_{ar}^0 + [9h + w] \cdot 1,24$$

$$b) \quad V_g = V_g^0 + (m - 1) \cdot V_{ar}^0$$

Assim:

$$V_g^0 = 1,8535 \cdot 0,523 + 0,683 \cdot 0,005 + 0,8 \cdot 0,009 + 0,79 \cdot 6,03 + (9 \cdot 0,037 + 0,116) \cdot 1,24$$

$$V_g = 6,30 \text{ m}_n^3 / \text{kgcomb.}$$

Portanto:

$$V_g = 6,30 + 0,20 \cdot 6,03 = 7,51$$

$$\boxed{V_g = 7,51 \text{ m}_n^3 / \text{Kgcomb.}}$$

$$\dot{V}_{gtl} = 7,51 \cdot 61,9 = 464,87$$

$$\boxed{\dot{V}_{gtl} = 464,87 \frac{\text{m}_n^3}{\text{h}}}$$

3.4

Temperatura Adiabática da chama (T_{ad}):

Segundo o item 2.1.3.3., pág. 18 , vem:

$$a) \text{ PCI} \cdot M = n \Delta h_{\text{co}_2} + n \Delta h_{\text{h}_2\text{o}} + n \Delta h_{\text{so}_2} + n \Delta h_{\text{o}_2} + n \Delta h_{\text{h}_2}$$

$$b) h_{f\text{comb}}^{\circ} = M \cdot \text{PCI}$$

$$c) h_{f\text{co}_2}^{\circ} = - 94.054 \text{ kcal/kgmol}$$

$$d) h_{f\text{h}_2\text{o}}^{\circ} = - 57.798 \text{ kcal/kgmol}$$

$$e) h_{f\text{so}_2}^{\circ} = - 70.873 \text{ kcal/kgmol}$$

$$f) \Delta h_{\text{co}_2} = C_{p2} \cdot t_2 - 220,25$$

$$g) \Delta h_{\text{h}_2\text{o}} = C_{p2} \cdot t_2 - 199,00$$

$$h) \Delta h_{\text{so}_2} = C_{p2} \cdot t_2 - 235,75$$

$$i) \Delta h_{\text{o}_2} = C_{p2} \cdot t_2 - 199,25$$

$$j) \Delta h_{\text{n}_2} = C_{p2} \cdot t_2 - 173,50$$

Da composição do carvão (tabela 01) e da composição da cinza (tabela 02) , segue a tabela 06 px. pág., para a determinação do mol aparente do combustível:

TABELA 06

Número de moles dos componentes do carvão:

COMP.	%	m (g)	PM (g)	n
C	52,3	46,9	12,0112	3,90
H ₂	3,7	3,3	2,0159	1,64
N ₂	0,9	0,8	28,0134	0,03
O ₂	10,1	9,0	31,9988	0,28
S	0,5	0,5	32,0640	0,02
H ₂ O	11,6	10,4	18,0153	0,58
CINZAS	32,5	—	—	—
SiO ₂	63,1	19,1	60,0848	0,32
Al ₂ O ₃	23,0	7,0	111,9612	0,07
Fe ₂ O ₂	2,9	0,9	143,6928	0,01
MgO	0,6	0,1	40,3114	—
CaO	3,1	0,9	56,0794	0,02
Na ₂ O	1,1	0,3	61,9790	0,01
K ₂ O	1,3	0,4	94,2034	0,01
TiO	1,2	0,4	236,3688	—
Total Geral	111,6	100		6,89

Como o mol aparente do combustível será dado por:

$$M_{ap} = \frac{M_{total}}{n_{total}}, \text{ segue:}$$

$$M_{ap} = \frac{100}{6,89} = 14,51$$

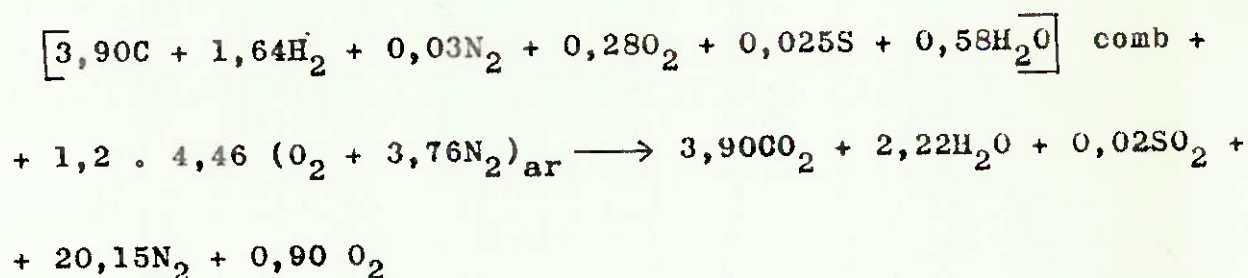
$$M_{ap} = 14,51 \text{ g}$$

Assim, o produto PCI . M resultará:

$$PCI . M = 5045 . 14,51 = 73.202,95$$

$$PCI . M = 73.202,95 \text{ kcal/kgmol}$$

Podemos escrever a reação de combustão simplificada da forma:



Assim vem:

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad & 3,90 [-94054 - 220,25 + Cp_2 t_2] co_2 + 2,22 [-57798 - 199 \\ & + Cp_2 t_2] H_2O + 0,02 [-70873 - 235,75 + Cp_2 t_2] so_2 + 20,15 \\ & [-173,5 + Cp_2 t_2] n_2 + 0,90 [-199,25 + Cp_2 t_2] o_2 = \\ & = - 73.202,95 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ou} \quad & 3,90 [-94.274,25 + Cp_2 t_2] co_2 + 2,22 [-57997 + Cp_2 t_2] H_2O + \\ & + 0,02 [-71.108,75 + Cp_2 t_2] so_2 + 20,15 [-173,5 + Cp_2 t_2] N_2 + \\ & + 0,90 [-199,25 + Cp_2 t_2] o_2 = - 73.202,95 \end{aligned}$$

Utilizando a tabela 04 da pág. 20 , retiramos os valores de Cp_2 e t_2 de cada componente para várias temperaturas.

Isto nos permite adotar temperaturas e comparar o resultado do 1º membro com a entalpia de formação do combustível (carvão).

A temperatura que verifica esta equação é a temperatura adiabática da chama.

1ª tentativa:

$$T_2 = 2000^{\circ}\text{C} \rightarrow Cp_2 \quad t_2 \quad \text{para:} \quad \left. \begin{array}{l} \text{CO}_2 = 25980 \\ \text{SO}_2 = 25540 \\ \text{O}_2 = 16840 \\ \text{H}_2\text{O} = 20820 \\ \text{N}_2 = 15960 \end{array} \right\} = - 16.717,24 > 73.202,95$$

2ª tentativa:

$$T_2 = 1800^{\circ}\text{C} \rightarrow Cp_2 \quad t_2 \quad \text{para:} \quad \left. \begin{array}{l} \text{CO}_2 = 23112 \\ \text{SO}_2 = 22806 \\ \text{O}_2 = 14994 \\ \text{H}_2\text{O} = 18360 \\ \text{N}_2 = 14238 \end{array} \right\} = - 69.778,02 > 73.202,95$$

3ª tentativa:

$$T_2 = 1750^{\circ}\text{C} \rightarrow Cp_2 \quad t_2 \quad \text{para:} \quad \left. \begin{array}{l} \text{CO}_2 = 22.391,25 \\ \text{SO}_2 = 22.072,75 \\ \text{O}_2 = 14.533,75 \\ \text{H}_2\text{O} = 17.753,75 \\ \text{N}_2 = 13.798,75 \end{array} \right\} = - 83.214,60 < 73.202,95$$

∴ a T_{ad} está compreendida entre 1750 e 1800°C , por interpolação, teremos:

$$1800^{\circ}\text{C} \quad - \quad 69.778,02$$

$$T_{ad} = ? \quad - \quad 73.202,95$$

$$1750^{\circ}\text{C} \quad - \quad 83.214,60$$

$$\frac{1800 - 1750}{83.214,60 - 69.778,02} = \frac{T_{ad} - 1750}{83.214,60 - 73.202,95}$$

$$\frac{50}{13.436,58} = \frac{T_{ad} - 1750}{10.011,65}$$

$$T_{ad} = \frac{50 \cdot 10.011,65}{13.436,58} + 1750 = 1787,26$$

Portanto:

$$T_{ad} = 1787,26^{\circ}\text{C}$$

3.5

Dimensionamento em função das perdas

De início supomos que as perdas fossem de 20% . As possíveis perdas envolvidas no processo são:

V_z - perdas por combustível residual nas cinzas

V_h - perdas por diferença de entalpia dos gases

V_{aq} - perdas por aquecimento de ar

μ - perdas por irradiação

mas : $\eta = \mu = 1 - V_z - V_{aq} - V_h$ (pois é o calor realmente aproveitado).

Assim, temos:

$$V_z + V_h + V_{aq} + \mu = 1$$

3.5.1 Cálculo de V_h

Segundo a figura 13, pág. 38, vem:

$$H_h = k \frac{t_{ad} - t_a}{\% CO_2}, \text{ onde:}$$

a) $k = k(\% CO_2, w)$

b) $\% CO_2 = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{V_g} \text{ e}$

c) $\dot{V}_{CO_2} = 1,8535 \text{ c} \quad m_N^3 / \text{kgcomb.} \quad (c = 0,523)$

$$\% CO_2 = \frac{0,97}{7,51} = 0,13 = 13\%$$

A umidade do combustível é 11,6%

Assim $k = 0,69$

Admitindo t_a (temperatura de admissão) igual a 200°C , finalmente, temos:

$$H_h = 0,69 \frac{1787,26 - 200}{13} = 84,25 \text{ kcal/kg}$$

$$V_h = \frac{H_h}{PCI} = \frac{84,25}{5045} = 0,0167 = 1,67\%$$

3.5.2 Cálculo de V_z

Segundo a figura 11, pág. 36 , vem:

$$a) \quad V_z = V_z (B)$$

$$b) \quad B = \frac{PCI \cdot \dot{m}_{comb}}{S_1}$$

$$c) \quad S_1 = \pi \cdot L \cdot D$$

$$d) \quad \text{Usualmente } L = 1,3 D$$

Admitindo-se $D = 1,0m$, tem-se:

$$L = 1,0 \cdot 1,3 = 1,3m$$

portanto:

$$S_1 = \pi \cdot 1,3 \cdot 1,0 = 4,08 \text{ m}^2$$

finalmente:

$$B = \frac{5045 \cdot 61,9}{4,08} = 0,77 \cdot 10^5 \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

$$B = 0,77 \cdot 10^5 \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

Entrando na figura 11 com B e 32,5% o teor de cinzas , retiramos imediatamente:

$$V_z = 0,062 = 6,2\%$$

3.5.3 Cálculo de μ

Segundo o item 2.2.4 , pág. 33 , temos:

$$\mu = \frac{100 \cdot c}{1 + \frac{100 \cdot \dot{G}r}{\dot{J}_o} \sqrt{\frac{\dot{J}_o}{1000 \cdot F_p}}}$$

onde:

$$a) \quad F_p = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \longrightarrow F_p = \frac{\pi}{4} \longrightarrow F_p = 0,79 \text{ m}^2$$

$$b) \quad c = 0,044^2 \quad (\text{adotado, pois } 0,0387 \leq c \leq 0,0442)$$

$$c) \quad \dot{G}r_1 = \text{vazão mássica dos gases de combustão}$$

$$\dot{G}r_1 = \bar{\rho}_g \cdot V_{g_{t1}} \cdot x$$

$$d) \quad \bar{\rho}_g = \frac{(\rho_{CO_2} \cdot \dot{V}_{CO_2} + \rho_{H_2O} \cdot \dot{V}_{H_2O} + \rho_{SO_2} \cdot \dot{V}_{SO_2} + \rho_{N_2} \cdot \dot{V}_{N_2} + \rho_{O_2} \cdot \dot{V}_{O_2})}{\dot{V}_{g_{t1}}} \dot{m}_1$$

Assim:

$$\dot{G}r_1 = (\rho_{CO_2} \cdot \dot{V}_{CO_2} + \rho_{H_2O} \cdot \dot{V}_{H_2O} + \rho_{SO_2} \cdot \dot{V}_{SO_2} + \rho_{N_2} \cdot \dot{V}_{N_2} + \rho_{O_2} \cdot \dot{V}_{O_2}) \dot{m}_1$$

e) Volumes dos Componentes:

$$\dot{V}_{\text{co}_2} = 1,8535 \cdot C \longrightarrow \dot{V}_{\text{co}_2} = 0,97 \text{ m}_N^3 / \text{kgcomb}$$

$$\dot{V}_{\text{h}_2\text{o}} = 11,16 \cdot h + 1,24w \longrightarrow \dot{V}_{\text{h}_2\text{o}} = 0,56 \text{ m}_N^3 / \text{kgcomb}$$

$$\dot{V}_{\text{so}_2} = 0,683 \cdot s \longrightarrow \dot{V}_{\text{so}_2} = 0,0034 \text{ m}_N^3 / \text{kgcomb}$$

$$\dot{V}_{\text{n}_2} = 0,8 \cdot n + 0,95 \dot{V}_{\text{ar}}^{\text{o}} \longrightarrow \dot{V}_{\text{n}_2} = 5,74 \text{ m}_N^3 / \text{kg comb}$$

$$\dot{V}_{\text{o}_2} = 0,042 \cdot \dot{V}_{\text{ar}}^{\text{o}} \longrightarrow \dot{V}_{\text{o}_2} = 0,25 \text{ m}_N^3 / \text{kgcomb}$$

f) Densidades dos componentes:

$$\rho_{\text{o}_2} = 1,1056 \cdot \rho_{\text{ar}}$$

$$\rho_{\text{co}_2} = 1,529 \cdot \rho_{\text{ar}}$$

$$\rho_{\text{h}_2\text{o}} = 0,623 \cdot \rho_{\text{ar}}$$

$$\rho_{\text{n}_2} = 0,971 \cdot \rho_{\text{ar}}$$

$$\rho_{\text{so}_2} = 2,208 \cdot \rho_{\text{ar}}$$

$$\rho_{\text{ar}}(t) = \frac{1}{2,841 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,773}$$

supomos estar os gases à T_{ad} , segue:

$$\rho_{\text{ar}}(1787,26^\circ\text{C}) = \frac{1}{2,841 \cdot 10^{-3} \cdot 1787,26 + 0,773} \longrightarrow$$

$$\rho_{\text{ar}} = 0,171 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Logo:

$$\rho_{O_2} = 1,1056 \cdot 1,71 \cdot 10^{-1} \longrightarrow \rho_{O_2} = 0,19 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{CO_2} = 1,529 \cdot 1,71 \cdot 10^{-1} \longrightarrow \rho_{CO_2} = 0,26 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{N_2} = 0,971 \cdot 1,71 \cdot 10^{-1} \longrightarrow \rho_{N_2} = 0,17 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{H_2O} = 0,623 \cdot 1,71 \cdot 10^{-1} \longrightarrow \rho_{H_2O} = 0,11 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{SO_2} = 2,208 \cdot 1,71 \cdot 10^{-1} \longrightarrow \rho_{SO_2} = 0,38 \text{ kg/m}^3$$

Portanto:

$$\dot{G}_{r1} = (0,25 + 0,06 + 0,001 + 0,98 + 0,05) 61,9 \longrightarrow$$

$\dot{G}_{r1} = 83,01 \text{ kg/h}$

$$g) J_{01} = \frac{Q}{8} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{8} \qquad J_{01} = 3,13 \cdot 10^5 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

logo :

$$\mu = \frac{100 \cdot 0,0442}{1 + \frac{1000 \cdot 83,01}{3,13 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{3,13 \cdot 10^5}{1000 \cdot 0,79}}}$$

$$\mu = 0,704$$

Notemos que $\mu \ll \eta_{adot} \approx 80\%$

Logo devemos reiterar admitindo $\eta \approx 0,70$

Com isso obtemos os resultados:

$$Q = 2,86 \cdot 10^6 \text{ kcal/h} \quad (\text{pág. 53})$$

$$\dot{m}_t = 566,33 \text{ kg/h} \quad (\text{pág. 53})$$

$$\dot{m}_1 = 70,79 \text{ kg/h} \quad (\text{pág. 54})$$

$$\dot{L}_{tl} = 661,9 \text{ kg ar/h} \quad (\text{pág. 55})$$

$$\dot{V}_{g_{tl}} = 531,63 \text{ m}_N^3 / \text{h} \quad (\text{pág. 55})$$

$$B = 0,875 \cdot 10^5 \text{ kcal/m}^2\text{h} \quad (\text{pág. 62})$$

$$\dot{G}_{rl} = 94,93 \text{ kg/h} \quad (\text{pág. 65})$$

$$J_{ol} = 3,58 \cdot 10^5 \text{ kcal/h} \quad (\text{pág. 65})$$

Assim:

$$\mu = \frac{100 \cdot 0,0442}{1 + \frac{1000 \cdot 94,93}{3,58 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{3,58 \cdot 10^5}{1000 \cdot 0,79}}} \longrightarrow$$

$$\mu = 0,6652$$

Ainda assim, $\mu \ll \eta_{adot}$

Logo devemos reiterar mais uma vez ainda, admitindo-se desta vez $\eta \approx 0,65$.

Com isso obtemos os resultados:

$$Q = 3,08 \cdot 10^6 \text{ kcal/h} \quad (\text{pág. 53})$$

$$\dot{m}_t = 609,90 \text{ kg/h} \quad (\text{pág. 53})$$

$$\dot{m}_l = 76,24 \text{ kg/h} \quad (\text{pág. 54})$$

$$\dot{L}_{tl} = 712,82 \text{ kg ar/h} \quad (\text{pág. 55})$$

$$\dot{V}_{gtl} = 572,56 \text{ m}_N^3 / \text{h} \quad (\text{pág. 55})$$

$$B = 0,943 \cdot 10^5 \text{ kcal/m}^2 \text{ h} \quad (\text{pág. 62})$$

$$\dot{G}_{rl} = 102,16 \text{ kg/h} \quad (\text{pág. 65})$$

$$J_{ol} = 3,85 \cdot 10^5 \text{ kcal/h} \quad (\text{pág. 65})$$

Assim:

$$\mu = \frac{100 \cdot 0,0442}{1 + \frac{1000 \cdot 102,16}{3,85 \cdot 10^5} \quad \frac{3,85 \cdot 10^5}{1000 \cdot 0,79}}$$

$$\mu = 0,645$$

Finalmente verificamos que

$$\mu \approx \eta_{\text{adotado}}$$

Concluimos portanto que o dimensionamento até este ponto está dentro dos limites de tolerâncias permissíveis (0,5% de diferença no rendimento). Continuemos então, tomando os valores acima calculados como verdadeiros.

$$V_{aq} = 1 - \mu - V_h - V_z \quad \text{onde:}$$

$$\mu = 0,645 \quad (\text{pág. 67})$$

$$V_h = 0,0167 \quad (\text{pág. 61})$$

$$V_z = 0,062 \quad (\text{pág. 62}) \quad \text{assim:}$$

$$V_{aq} = 1 - 0,645 - 0,0167 - 0,062$$

$$V_{aq} = 0,276$$

$$V_{aq} = 27,6\%$$

3.6 Temperatura de pré-aquecimento do ar

Aqueceremos todo o Ar necessário à combustão. Esta quantidade pode ser dividida em:

Ar primário:

Aquele que é injetado concomitantemente ao carvão pulverizado. Recomenda-se que este seja 90% do Ar total. Assim, sua vazão será:

$$\dot{m}_{ar \text{ pr}} = \dot{L}_{tl} \cdot 0,90 \longrightarrow \dot{m}_{ar \text{ pr}} = 712,82 \cdot 0,90 \longrightarrow$$

$$\dot{m}_{ar \text{ pr}} = 641,54 \text{ kg/h}$$

Ar secundário:

Aquele que é injetado para complemento da combustão. Este será, então, 10% do Ar total, ou seja:

$$\dot{m}_{ar \text{ se}} = 712,82 \cdot 0,10 \longrightarrow \dot{m}_{ar \text{ se}} = 71,28 \text{ kg/h}$$

A quantidade de ar horária a ser aquecida será:

$$\dot{L}_{tl} = 712,82 \text{ kg/h}$$

Sua temperatura final no pré-aquecimento é dada por:

$$a) \dot{m}_1 \cdot \bar{C}_{pca} (\bar{T}_m - T_{adca}) = \dot{L}_{tl} \cdot \bar{C}_{par} (T_{s\ ar} - \bar{T}_m)$$

$$b) \bar{C}_p = \frac{\sum (\%)_i \cdot \bar{C}_{pi}}{\sum (\%)_i}, \text{ onde:}$$

$\dot{m}_1$: vazão horária de combustível

$\bar{C}_{pca}$: calor específico médio do combustível

$\bar{T}_m$: temperatura média da mistura combustível/ar

T_{adca} : temperatura de admissão do combustível

$\bar{C}_{par}$: calor específico médio do ar

$T_{s\ ar}$: temperatura de admissão do ar (saída do trocador)

$(\%)_i$: porcentagem do componente i no combustível

$\bar{C}_{pi}$: calor específico médio do componente i

Os componentes do carvão e os seus respectivos calores específicos são:

COMPONENTE	COMPOSIÇÃO(%)	$\bar{C}_{p_i}$ (kcal/kg ⁰ K)
O ₂	10,1	0,219
H ₂ O	11,6	0,445
N ₂	0,9	0,248
H ₂	3,7	3,43
C	52,3	0,295
	22,5	0,241

Assim:

$$\bar{Cp}_{ca} = \frac{10,1 \cdot 0,291 + 11,6 \cdot 0,445 + 0,9 \cdot 0,248 + 3,7 \cdot 3,43 + 52,3 \cdot 0,295 + 32,5 \cdot 0,241}{10,1 + 11,6 + 0,9 + 3,7 + 52,3 + 32,5}$$

$$\bar{Cp}_{ca} = 0,392 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^{\circ}\text{K}}$$

Como foi admitida a temperatura média da mistura combustível/ar $\bar{T}_m = 200^{\circ}\text{C}$, admitindo a temperatura de admissão do combustível

$T_{adca} = 25^{\circ}\text{C}$ e conhecendo:

$\dot{m}_1 = 76,24 \text{ kg/h}$ (pág.67) e $\dot{L}_{tl} = 712,82 \text{ kg ar/h}$, logo:

$$76,24 \cdot 0,392 \cdot (200 - 25) = 712,82 \cdot 0,24 (T_s \text{ ar} - 200) \longrightarrow$$

$$\longrightarrow T_s \text{ ar} = 200 + \frac{5230,06}{171,08} \longrightarrow$$

$$\longrightarrow T_s \text{ ar} = 200 + 30,57 \longrightarrow \boxed{T_s \text{ ar} = 230,57^{\circ}\text{C}}$$

A temperatura média T_{bar} será expressa pela média aritmética das temperaturas de entrada no trocador e admissão na mistura.

Assim, admitindo que este entre a 25°C , segue:

$$tb_{ar} = \frac{25 + 230,57}{2} \longrightarrow \boxed{tb_{ar} = 127,78^{\circ}\text{C}}$$

3.7 Temperatura da superfície externa do isolante

É desejável que o Ar escoe no duto em regime turbulento -
($Re_d > 6.000$) para facilitar a transferência de calor por convecção da superfície do trocador para o ar de alimentação.

Como primeira aproximação, admitiremos uma velocidade para o ar v_{ar} abaixo:

$$v_{ar} = 20 \text{ m/s}$$

Se percebermos que este valor gera incompatibilidade no trocador ou no queimador, reiteraremos os cálculos com outro valor, para esta velocidade.

Da mesma forma, se necessário for, injetaremos mais Ar no trocador que o necessário à combustão, sendo que o excesso - pode ser aproveitado em outra etapa do processo de utilização do forno, tal como para secagem.

Sabemos que:

a) $\dot{V}_{ar} = S \cdot v$ onde: $\dot{V}_{ar} \rightarrow$ vazão volumétrica de ar
 $S \rightarrow$ área transversal de escoamento no trocador

b) $\dot{V}_{ar} = \frac{\dot{L}_{tl}}{\rho_{ar}}$ onde: $\rho_{ar} \rightarrow$ densidade do ar à temperatura média.

para a temperatura: $t_{bar} = 127,78^\circ\text{C}$, segue as propriedades (pág. 70):

- densidade $\rightarrow \rho = 0,853 \text{ kg/m}^3$
- viscosidade dinâmica $\rightarrow \mu = 2,35 \cdot 10^{-6} \text{ kg}^x \text{ s/m}^2$
- condutividade térmica $\rightarrow k = 0,0290 \frac{\text{kcal}}{\text{hm}^\circ\text{C}}$
- número de Prandtl $\rightarrow Pr = 0,70$
- Calor específico $\rightarrow C_p = 0,242 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$

Assim, tem-se:

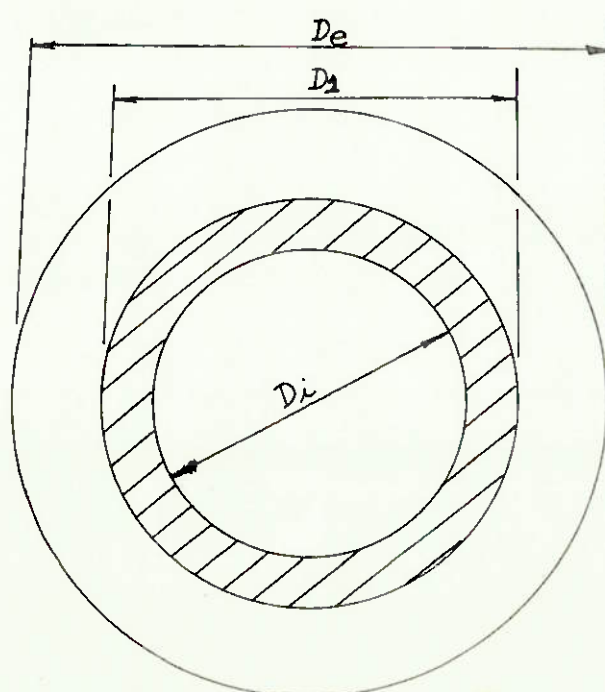
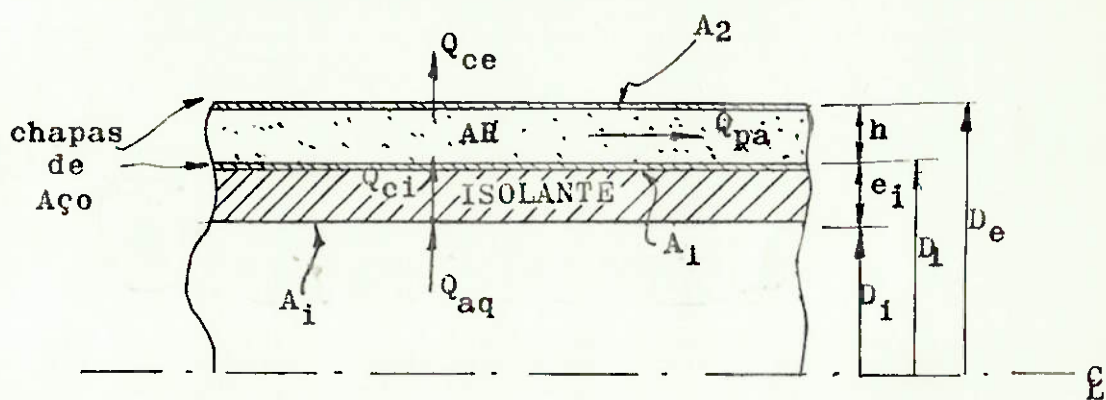
$$\dot{V}_{ar} = \frac{712,82}{0,853} \longrightarrow \begin{aligned} \dot{V}_{ar} &= 835,66 \text{ m}^3/\text{h} \\ &= 0,232 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Como este valor é muito pequeno aqueceremos a quantidade de $\dot{V}_{ar} \approx 3,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Como $S = \frac{\dot{V}_{ar}}{v}$, vem:

$$S = \frac{3,5}{20} \longrightarrow S = 0,175 \text{ m}^2$$

O trocador de calor por nós proposto consiste numa coroa envolvente ao núcleo do queimador, que por sua vez é recoberto por material isolante, conforme os esquemas abaixo:



A área da secção transversal do escoamento do ar aquecido, cor responde a uma coroa circular, cuja expressão é dada por:

$$S = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_l^2)$$

Para esta secção, o diâmetro hidráulico D_h é dado por:

$$D_h = 4 \cdot \frac{\text{Área transversal}}{\text{Perímetro molhado}} \quad \text{ou}$$

$$D_h = 4 \cdot \frac{(\pi/4) (D_e^2 - D_l^2)}{\pi (D_l + D_2)}$$

Logo:

$$D_h = D_e - D_l$$

onde: D_e : diâmetro externo do trocador

D_l : diâmetro interno do trocador

Para a estimativa das áreas de trocas de calor A_l , A_e e D_h , admitiremos primeiramente que o queimador esteja recoberto internamente por uma única camada de tijolo isolante de caulim ($k_i = 1,05 \text{ kcal/h m}^2\text{C}$).

Estes são padronizados e sua espessura é:

$$e_r = 0,05 \text{ m}$$

Logo: $e_i = e_r$, onde: e_i = espessura do isolante no trocador

e_r = espessura de cada camada.

Portanto:

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad D_1 &= D_i + 2 \cdot e_i \longrightarrow D_1 = 1 + 2 \cdot 0,05 \longrightarrow \\ &\longrightarrow D_1 = 1,1 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b)} \quad A_1 &= \pi \cdot D_1 \cdot L \longrightarrow A_1 = \pi \cdot 1,1 \cdot 1,3 \longrightarrow \\ &\longrightarrow A_1 = 4,49 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{e:} \quad S &= \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_1^2) \longrightarrow D_e^2 = \frac{4 \cdot S}{\pi} + D_1^2 \longrightarrow \\ \longrightarrow D_e^2 &= \frac{4 \cdot 0,175}{\pi} + 1,1^2 \longrightarrow D_e^2 = 1,433 \longrightarrow \\ \longrightarrow D_e &= 1,197 \text{ m} \quad D_h = 0,097 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c)} \quad Re_d &= \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu} \longrightarrow Re_d = \frac{0,853 \cdot 20 \cdot 0,097}{2,35 \cdot 10^{-6}} \longrightarrow \\ &\longrightarrow Re_d = 7,04 \cdot 10^5 \quad \therefore \quad \text{escoamento turbulento} \end{aligned}$$

Portanto:

$$\begin{aligned} \text{d)} \quad \bar{Nu}_{Dh} &= 0,023 \cdot \left[1 + \left(\frac{D_h}{L} \right)^{0,7} \right] \cdot Re_{Dh}^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \\ \bar{Nu}_{Dh} &= 0,023 \cdot \left[1 + \left(\frac{0,097}{1,3} \right)^{0,7} \right] \cdot (7,04 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 0,7^{0,33} \\ \bar{Nu}_{Dh} &= 1.144,8 \end{aligned}$$

$$e) \quad \bar{h}_c = \frac{\bar{Nu}_d \cdot k}{L} \longrightarrow \bar{h}_c = \frac{1.144,8 \cdot 0,029}{1,3} \longrightarrow$$

$$\bar{h}_c = 25,54 \frac{\text{kcal}}{\text{hm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

O calor trocado pelo Ar com a superfície interna do queimador será:

$$\dot{Q}_{cl} = \dot{Q}_T \cdot V_{aq} \quad \text{onde: } \dot{Q}_T = Vol = 3,85 \cdot 10^5 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \quad \left(\begin{array}{l} \text{pág.} \\ 67 \end{array} \right)$$

$$V_{aq} = 0,276 \quad (\text{pág. 68})$$

Assim:

$$\dot{Q}_{cl} = 3,85 \cdot 10^5 \cdot 0,276 \longrightarrow$$

$$\dot{Q}_{cl} = 1,063 \cdot 10^5 \text{ kcal/h}$$

finalmente:

$$\dot{Q}_{cl} = \bar{h}_c \cdot A_l \cdot \triangle T_l \longrightarrow \triangle T_l = \frac{\dot{Q}_{cl}}{\bar{h}_c \cdot A_l} \longrightarrow$$

$$\triangle T_l = \frac{1,063 \cdot 10^5}{25,54 \cdot 4,49} \longrightarrow$$

$$\triangle T_l = 927 \text{ } ^\circ\text{C}$$

e:

$$T_{sup} = \triangle T_l + t_{bar} \longrightarrow T_{sup} = 927 + 127,78 \longrightarrow$$

$$T_{sup} = 1054,84 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sendo esta temperatura muito aquém da realidade.

Assim, aumentaremos a quantidade de Ar injetada.

Portanto, fazendo-se:

$$\dot{V}_{ar} = 8,5 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{vem:}$$

$$1) \quad S = \frac{8,5}{20} \quad (\text{pág. 72}) \quad \longrightarrow \quad S = 0,425 \text{ m}^2$$

$$2) \quad D_e = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,425}{\pi} + 1,1^2} \quad (\text{pág. 74}) \quad \longrightarrow \quad D_e = 1,323 \text{ m}$$

$$3) \quad D_h = D_e - D_1 \quad (\text{pág. 73}) \quad \longrightarrow \quad D_h = 0,223 \text{ m}$$

$$4) \quad Re_{Dh} = \frac{0,853 \cdot 20 \cdot 0,223}{2,35 \cdot 10^{-6}} \quad \longrightarrow \quad Re_{Dh} = 1,621 \cdot 10^6$$

$$5) \quad \bar{Nu}_{Dh} = 0,023 \left[1 + \left(\frac{0,223}{1,3} \right)^{0,7} \right] \cdot (1,621 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot 0,7^{0,33} \quad \longrightarrow$$

$$\longrightarrow \quad \bar{Nu}_{Dh} = 2.451,31$$

$$6) \quad \bar{h}_c = \frac{2.451,31 \cdot 0,029}{1,3} \quad \longrightarrow \quad \bar{h}_c = 54,68 \frac{\text{kcal}}{\text{hm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$7) \quad \triangle T_1 = \frac{1.063 \cdot 10^5}{54,68 \cdot 4,49} \quad \longrightarrow \quad \triangle T_1 = 432,95 \text{ } ^\circ\text{C}$$

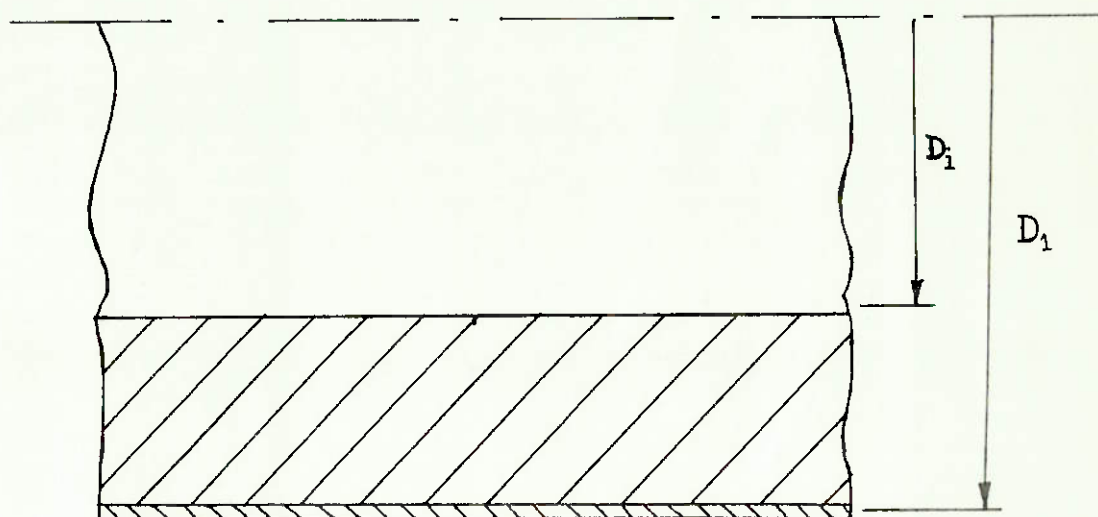
$$8) \quad T_{\text{sup}} = 432,95 + 127,78 \longrightarrow$$

$$T_{\text{sup}} = 560,73 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Se admitirmos esta temperatura como razoável, segue:

3.8

Temperatura da superfície interna do queimador



Nesta, haverá condução, sabendo que: o calor transmitido por condução, nestas condições, é:

$$q_k = \frac{\triangle T}{\ln (D_1/D_i)} \cdot 2 \cdot \pi \cdot k \cdot l \longrightarrow$$

$$\triangle T = q_k \cdot \frac{\ln (D_1/D_i)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot l}$$

Com os valores conhecidos:

$$Q_k = Q_{cl} = 1,063 \cdot 10^5 \text{ kcal/h} \quad (\text{pág. 75})$$

$$R_1 = 0,55 \text{ m} \quad (\text{pág. 74})$$

$$R_i = 0,50 \text{ m} \quad (\text{pág. 62})$$

$$k = 1,05 \frac{\text{kcal}}{\text{hm } ^\circ\text{C}} \quad (\text{pág. 74})$$

$$l = 1,3 \text{ m} \quad (\text{pág. 62})$$

segue:

$$\triangle T = \frac{1,063 \cdot 10^5 \cdot \ln(0,55/0,5)}{2 \cdot \pi \cdot 1,15 \cdot 1,3} \longrightarrow$$

$$\triangle T = 1.078,58 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Como:

$$T_{\text{supi}} = T_e + \triangle T \longrightarrow T_{\text{supi}} = 560,73 + 1.078,58 \longrightarrow$$

$$T_{\text{supi}} = 1.639,31 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Esta temperatura alcançada pode ser considerada excelente, pois é maior que a temperatura de amolecimento das cinzas ($T_m = 1450^\circ\text{C}$, conforme tabela 02) e é menor que a temperatura a diabática de chama calculada ($T_{ad} = 1787,26^\circ\text{C}$).

Concluimos portanto que até aqui os cálculos estão coerentes.

3.9

Temperatura da superfície externa do queimador

O calor que o Ar pré-aquecido perde para esta superfície é dado por:

$$Q_{c2} = Q_{aq} - Q_{pa} \quad \text{onde:}$$

$$Q_{aq} = 1,063 \cdot 10^5 \text{ kcal/h}$$

e:

$Q_{pa} \longrightarrow$ calor necessário para pré-aquecer o Ar, da
do por:

$$Q_{pa} = \dot{m}_{ar} \cdot C_{par} \cdot \triangle T_{ar} = \dot{m}_{ar} \cdot C_{par} \cdot (T_{adar} - T_{ear})$$

São conhecidos os valores:

$$C_{par} = 0,242 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$T_{adar} = 230,57 ^\circ\text{C}$$

$$T_{ear} = 25 ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{ar} = 0,853 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{V}_{ar} = 8,5 \text{ m}^3/\text{s} = 3,06 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$$

Assim, tem-se:

$$Q_{pa} = 3,06 \cdot 10^4 \cdot 0,853 \cdot 0,242 (230,57 - 25) \longrightarrow$$

$$Q_{pa} = 1,30 \cdot 10^6 \text{ kcal/h}$$

Como $Q_{aq} < Q_{pa}$, devemos diminuir a quantidade de Ar injetada. A quantidade máxima que podemos injetar é:

$$\dot{V}_{ar \text{ máx}} = \frac{Q_{aq}}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T} \longrightarrow$$

$$\dot{V}_{ar \text{ máx}} = \frac{1,063 \cdot 10^5}{0,853 \cdot 0,242 \cdot (230,57 - 25)} \longrightarrow$$

$$\dot{V}_{ar \text{ máx}} = 2.505,0 \text{ m}^3/\text{h} \quad \text{ou}$$

$\dot{V}_{ar \text{ máx}} = 0,69 \text{ m}^3/\text{s}$

Se usarmos esta condição, não teremos perda de calor pela superfície externa, pois todo calor transmitido para o trocador será utilizado no pré-aquecimento do Ar. Teremos então:

$T_{supe} \approx 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Partiremos portanto desta condição.

Para evitar modificações profundas nos demais valores de temperatura alcançados, devemos alterar a velocidade de escoamento do Ar. Para termos uma idéia do quanto devemos alterá-la, façamos:

$$Re_{Dh} \geq k \cdot v_1 \cdot Dh_1 \longrightarrow v_2 \cdot Dh_2 \geq v_1 \cdot Dh_1 \quad \text{onde,}$$

os índices "1" referem-se a valores anteriores e

"2" referem-se aos novos valores.

Logo:

$$v_2 \cdot Dh_2 \geq 20 \cdot 0,223$$

$$v_2 \cdot Dh_2 \geq 4,460 \quad (A)$$

mas como:

$$Dh = D_e - D_1 \quad (\text{pág. 73})$$

$$D_e = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} + D_1^2 \quad (\text{pág. 74})$$

$$S = \frac{\dot{V}_{ar}}{v} \quad (\text{pág. 72})$$

segue:

$$Dh_2 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{\dot{V}_{ar}}{v_2} + D_1^2} - D_1$$

$$\text{conhecidos os valores: } \dot{V}_{arm\acute{a}x} = 0,69 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{pág.80})$$

$$D_1 = 1,10 \text{ m} \quad (\text{pág.74})$$

segue:

$$Dh_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,69}{v_2} + 1,1^2} - 1,1 \rightarrow$$

$$\rightarrow Dh_2 = \sqrt{\frac{0,879}{v_2} + 1,1^2} - 1,1 \quad (B)$$

com as expressões (A) e (B) acima, vem:

$$v_2 \sqrt{\frac{0,879}{v_2} + 1,1^2} - 1,1 \geq 4,460 \quad \sqrt{\frac{0,879}{v_2} + 1,1^2} \frac{4,460}{v_2} + 1,1$$

$$\rightarrow \frac{0,879}{v_2} \geq \frac{19,892}{v_2^2} + \frac{9,81}{v_2} \rightarrow \boxed{-78,89 \leq v_2 \leq -2,29 \text{ m/s}}$$

Portanto impossível de se conseguir com o valor de D_1 adotado (pág. 74).

Reiteremos assumindo que o trocador esteja agora recoberto, por 2 camadas de tijolo isolante de magnésia de espessura - 0,05 m, cuja condutibilidade térmica é:

$$k_1 = 2,5 \frac{\text{kcal}}{\text{h m } ^\circ\text{C}}$$

Portanto, seguem-se os novos valores calculados:

$$a) \quad e_1 = 2 \cdot e_r \text{ (pág.74)} \longrightarrow e_1 = 2 \cdot 0,05 \longrightarrow e_1 = 0,1 \text{ m}$$

$$b) \quad D_1 = D_i + 2 \cdot e_1 \text{ (pág.74)} \longrightarrow D_1 = 1 + 2 \cdot 0,1 \longrightarrow D_1 = 1,2 \text{ m}$$

$$c) \quad A_1 = \quad \cdot D_1 \cdot L \text{ (pág.74)} \longrightarrow A_1 = \quad \cdot 1,2 \cdot 1,3 \longrightarrow A_1 = 4,90 \text{ m}^2$$

$$d) \quad S = \frac{\dot{V}_{\text{ar máx}}}{v} \text{ (pág.72)}$$

passaremos a adotar $v = 10 \text{ m/s}$

Com: $\dot{V}_{\text{ar máx}} = 0,69 \text{ m}^3/\text{s}$ (pág. 80), vem:

$$S = \frac{0,69}{10} \longrightarrow S = 0,069 \text{ m}^2$$

$$e) \quad D_e = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi} + D_1^2} \text{ (pág.74)} \longrightarrow D_e = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,069}{\pi} + 1,2^2}$$

$$D_e = 1,236 \text{ m}$$

$$f) Dh = D_e - D_1 \quad (\text{pág. 73}) \quad \longrightarrow Dh = 1,236 - 1,2 \quad \longrightarrow Dh = 0,036m$$

$$g) Re_d = \frac{\rho \cdot v \cdot Dh}{\mu} \quad (\text{pág. 74}) \quad \text{com as propriedades do Ar da pág. 71, segue:}$$

$$Re_d = \frac{0,853 \cdot 10 \cdot 0,036}{2,35 \cdot 10^{-6}} \quad \longrightarrow \quad Re_d = 1,307 \cdot 10^5$$

$$h) \bar{Nu}_d = 0,023 \cdot \left[1 + \left(\frac{Dh}{L} \right)^{0,7} \right] \cdot Re_d^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \quad (\text{pág. 74})$$

$$\bar{Nu}_d = 0,023 \cdot \left[1 + \left(\frac{0,036}{1,3} \right)^{0,7} \right] \cdot (1,307 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot (0,7)^{0,33}$$

$$\bar{Nu}_d = 273,87$$

$$i) \bar{h}_c = \frac{\bar{Nu}_d \cdot k}{L} \quad (\text{pág. 75}) \quad \longrightarrow \quad \bar{h}_c = \frac{273,87 \cdot 0,029}{1,3} \quad \longrightarrow$$

$$\longrightarrow \bar{h}_c = 6,109 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$j) T_1 = \frac{\dot{Q}_{c1}}{\bar{h}_c \cdot A_1} \quad (\text{pág. 75}) \quad \longrightarrow \quad T_1 = \frac{1,063 \cdot 10^5}{6,109 \cdot 4,9} \quad \longrightarrow$$

$$\longrightarrow T_1 = 3551,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

esta é muito aquém da realidade, façamos portanto outra reite-
ração para velocidade:

$$\underline{\underline{v = 100 \text{ m/s}}}$$

Assim, vem:

$$a) \quad S = \frac{\dot{V}_{ar \text{ máx}}}{v} \quad (\text{pág. 72}) \longrightarrow S = \frac{0,69}{100} \longrightarrow S = 0,069 \text{ m}^2$$

$$b) \quad D_e = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi} + D_1^2} \quad (\text{pág. 74}) \longrightarrow D_e = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,069}{\pi} + 1,2^2} \longrightarrow D_e = 1,236 \text{ m}$$

$$c) \quad Dh = D_e - D_1 \quad (\text{pág. 73}) \longrightarrow Dh = 1,236 - 1,20 \longrightarrow Dh = 0,036 \text{ m}$$

$$d) \quad Re_d = \frac{\rho \cdot v \cdot Dh}{\mu} \quad (\text{pág. 74}) \longrightarrow Re_d = \frac{0,853 \cdot 100 \cdot 0,036}{2,35 \cdot 10^{-6}} \longrightarrow$$

$$\longrightarrow Re_d = 1,31 \cdot 10^6$$

$$e) \quad \bar{Nu}_d = 0,023 \cdot \left[1 + \left(\frac{Dh}{L} \right)^{0,7} \right]^{0,8} \cdot Re_d^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \quad (\text{pág. 74})$$

$$\bar{Nu}_d = 0,023 \cdot \left[1 + \left(\frac{0,036}{1,3} \right)^{0,7} \right]^{0,8} \cdot (1,31 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot (0,7)^{0,33}$$

$$\bar{Nu}_d = 1.731,17$$

$$f) \quad \bar{h}_c = \frac{\bar{Nu}_d \cdot k}{L} \quad (\text{pág. 75}) \longrightarrow \bar{h}_c = \frac{1731,17 \cdot 0,029}{1,3} \longrightarrow$$

$$\longrightarrow \bar{h}_c = 38,62 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$g) \quad \Delta T_1 = \frac{\dot{Q}_{cl}}{h_c \cdot A_1} \quad (\text{pág. 75}) \quad \longrightarrow \quad \Delta T_1 = \frac{1,063 \cdot 10^5}{38,62 \cdot 4,9} \longrightarrow$$

$$\longrightarrow \Delta T_1 = 561,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h) \quad T_{sup} = \Delta T_1 + t_{bar} \quad (\text{pág. 75}) \longrightarrow T_{sup} = 561,75 + 127,78 \longrightarrow$$

$$\longrightarrow T_{sup} = 689,53 \text{ } ^\circ\text{C}$$

para uma chapa de aço, que é a superfície do trocador de calor, esta temperatura é razoável.

Assim, segue:

3.8 Temperatura da superfície interna do queimador (reiteração da página 77):

$$T = Q_k \cdot \frac{\ln (D_1/D_i)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot l} \quad (\text{pág. 77})$$

com os valores conhecidos:

$$Q_k = Q_{cl} = 1,063 \cdot 10^5 \quad (\text{pág. 75})$$

$$D_1 = 1,20 \text{ m} \quad (\text{pág. 82})$$

$$D_1 = 1,00 \text{ m} \quad (\text{pág. 62})$$

$$k = 2,5 \frac{\text{kcal}}{\text{h m } ^\circ\text{C}} \quad (\text{pág. 81})$$

$$l = 1,3 \text{ m} \quad (\text{pág. 62})$$

segue:

$$T = \frac{1,063 \cdot 10^5 \cdot \ln(1,20/1,00)}{2 \cdot \pi \cdot 1,3 \cdot 2,5} \rightarrow$$

$$\rightarrow T = 949,09 \text{ } ^\circ\text{C}$$

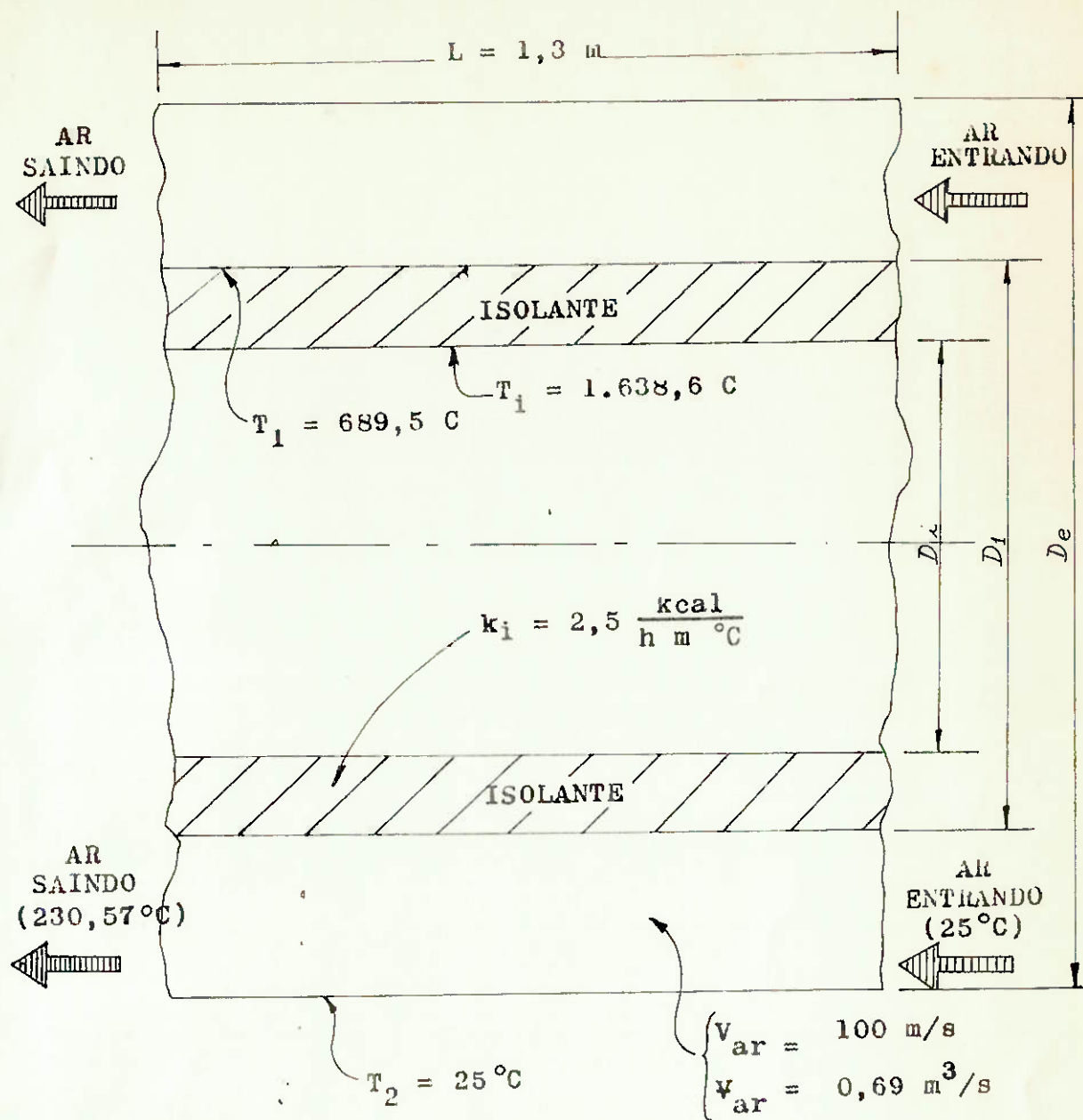
Assim, como:

$$T_{\text{supi}} = T_e + \Delta T \quad \text{e: } T_e = 689,53^\circ\text{C} \quad (\text{pág. 83}),$$

$$\text{vem: } T_{\text{supi}} = 689,53 + 949,09 \rightarrow$$

$$\rightarrow T_{\text{supi}} = 1.638,62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Concluindo, o queimador será conforme esquema abaixo:



Um desenho mais detalhado pode ser visto no Anexo I , que acompanha êste trabalho.

Tabela 07

Quantidades usuais de excesso de ar necessárias para abastecimen-
to de queimadores (De acordo com base)

COMBUSTÍVEL	TIPO DE FORNALHA OU QUEIMADOR	EXCESSO DE AR (%)
Carvão pul- verizado	1. Fornalhas resfriadas a água para remoção de resíduos ou cinzas	15-20
	2. Fornalha parcialmente resfriada a água para remoção de cinzas	15-20
Carvão bri- tado	Fornalha ciclone	10-15
CARVÃO	Grelha em esteira com tiragem forçada	15-20
	Grelha em esteira, tiragem forçada, alimentação inferior	20-50
	Grelha em esteira, tiragem natural	50-65
Óleo Combustível	Maçaricos a óleos, tipo mecânico	5-10
	Queimadores para combustíveis múltiplos e chamas em leque	10-20
Gás de forno de coque e gases de refinação	Queimadores para combustíveis múltiplos	7-12
Gás de alto forno	Queimador tipo vaporizador intertubular	15-18
Lenha	Fornalha holandesa (10-23% a travês das grelhas) e tipo Hofft	20-25
Bagago	Todas as fornalhas	25-35
Black liquor	Fornalha de recuperação usada na indústria de polpa para fabricação de papel pardo e soda	5-7

Tabela 08

Valores de m de acordo com Walther

Tipo de Forno ou queimador	Combustível	m
Grelha plana, alimentação manual	Carvão de pedra, Coque; antracito	1,8-2,0
Grelha plana, alimentação por projeção	Carvão de pedra, Coque	1,5-1,8
Grelha caminhante sem ar insuflado	Carvão de pedra	1,6-1,8
	Linhito em tijolos	1,5
	Coque	1,7-1,8
Grelha caminhante c/ar c/ insuflamento	Carvão de pedra	1,4-1,8
	Linhito em tijolos	1,4-1,5
	Turfa	1,5-1,7
	Madeira	1,4-1,6
Grelha inclinada c/ barras móveis, grelha es escada	Carvão de pedra Linhito	1,4-1,6
Combustível em pó	Todos	1,35
Fornalha ciclone ou de cinzas fundidas	Carvão de pedra	1,10-1,25
Combustível gasoso	- - - - -	1,10

4. BIBLIOGRAFIA

Para a elaboração deste trabalho foram utilizadas as seguintes publicações:

- 1 - DODGE, BARNETT F.
Chemical Engeneering Thermodynamics
Mc Graw Hill Book Co. Inc. - 1944
- 2 - KREITH, FRANK
Princípios da Transmissão de Calor
Editora Edgard Blucher Ltda - 1977
- 3 - VAN WYLEN, GORDON JOHN
Fundamentos da Termodinâmica Clássica
Editora Edgard Blucher Ltda. - 1976
- 4 - DUBBEL - MANUAL DA ENGENHEIRO MECÂNICO - vol IV
Hemus Livraria Editora - 1979
- 5 - SILVA, REMI BENEDITO
Manual de Termodinâmica e Transmissão de Calor
Departamento de Livros e Publicações - Grêmio Politécnico/EPUSP
- 6 - Revista Tecnológica Brasileira - nº 14 / vol III
Energia Fontes Alternativas
APC - Acessoria de Promoções e Cultura Editora Ltda.
- 7 - LEWIS, A.S.
Relatório do 7º Congresso Mundiale del Petrólio-1967
- 8 - GOVERMENT PRINTING OFFICE - U.S.A.
NACA - Basic Consideration in the Combustion of Hydrocarbon Fuels with Air
- 9 - Notas de aula do professor Euryale de Jesus Zerbine - do curso de Geradores de Vapor do 2º SEM/81 - EPUSP.
- 10 - Publicações e catálogos das empresas:
La Mont Kessel Herpen & Co
Babcock & Wilcox - Oberhausen
K.S.G. - Berlin
V.K.W. - Dusseldorf
Walther & Cie - Koln

4. BIBLIOGRAFIA

Para a elaboração deste trabalho foram utilizadas as seguintes publicações:

- 1 - DODGE, BARNETT F.
Chemical Engeneering Thermodynamics
Mc Graw Hill Book Co. Inc. - 1944
- 2 - KREITH, FRANK
Princípios da Transmissão de Calor
Editora Edgard Blucher Ltda - 1977
- 3 - VAN WYLEN, GORDON JOHN
Fundamentos da Termodinâmica Clássica
Editora Edgard Blucher Ltda. - 1976
- 4 - DUBBEL - MANUAL DA ENGENHEIRO MECÂNICO - vol IV
Hemus Livraria Editora - 1979
- 5 - SILVA, REMI BENEDITO
Manual de Termodinâmica e Transmissão de Calor
Departamento de Livros e Publicações - Grêmio Politécnico/EPUSP
- 6 - Revista Tecnológica Brasileira - nº 14 / vol III
Energia Fontes Alternativas
APC - Acessoria de Promoções e Cultura Editora Ltda.
- 7 - LEWIS, A.S.
Relatório do 7º Congresso Mundial del Petrólio-1967
- 8 - GOVERMENT PRINTING OFFICE - U.S.A.
NACA - Basic Consideration in the Combustion of Hydrocarbon Fuels with Air
- 9 - Notas de aula do professor Euryale de Jesus Zerbiní - do curso de Geradores de Vapor do 2º SEM/81 - EPUSP.
- 10 - Publicações e catálogos das empresas:
La Mont Kessel Herpen & Co
Babcock & Wilcox - Oberhausen
K.S.G. - Berlin
V.K.W. - Dusseldorf
Walther & Cie - Koln