



DEMÉTRIO ELIE BARACAT

Engº Mecânico, Escola de Engenharia Mauá, 1975.

UM MÉTODO PARA O DIMENSIONAMENTO TÉRMICO DE FORNOS

☆

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da USP para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof.Dr.Moyses Szajnbok  
Professor Assistente Doutor do  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Escola Politécnica da USP.

São Paulo, 1980.

FD - 357

A MEUS PAIS .



## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Moyses Szajnbok, pela incansável orientação e incentivo, que ultrapassou os limites deste trabalho.

Aos Professores Doutores Bartolomeo Albanese, Eitaro Yamane, Giorgio E.O.Giacaglia e João Augusto Breves Filho, pelo auxílio na formação matemática e acadêmica.

Aos professores e colegas, em cujas amizades e sugestões buscou-se o sustento da realização.

À Escola de Engenharia Mauã.

De forma especial aos meus pais, por me terem transmitido o devido suporte moral na primeira educação.

À Srta Margaret Miller Robertson, pelo trabalho de datilografia.

De todos, sinto-me devedor.

R E S U M O

Neste trabalho, após a introdução do capítulo I, são apresentados nos capítulos II e III, respectivamente, uma revisão sobre transmissão de calor em regime estacionário, e os combustíveis usados em fornos. Nos capítulos IV, V e VI apresentam-se informações sobre refratários e isolantes; tipos de fornos e métodos de projeto; avaliação de custos na instalação e operação de fornos.

No capítulo VII, suposto o regime estacionário e admitidas algumas hipóteses simplificadoras, desenvolveu-se um modelo para o cálculo por computador do revestimento de um forno, a partir do cálculo da temperatura adiabática de combustão. No procedimento obtém-se o dimensionamento dos refratários e isolantes a serem empregados, o fluxo térmico, e a temperatura da face interna do forno. De um conjunto de possíveis revestimentos, o programa seleciona o que apresenta o custo mínimo.

No capítulo VIII é mostrado o programa e são resolvidos alguns exemplos.

No capítulo IX são apresentadas as conclusões, comentando-se as soluções dos exemplos, e algumas possíveis linhas de pesquisa para desenvolvimentos futuros.

O trabalho é concluído com um conjunto de anexos e uma bibliografia.



ABSTRACT

In this paper, after the introduction of the first chapter, Chapter II and III respectively, introduce a review of steady flow heat transmission, and the combustible employed in furnaces. Information about refractories and insulating materials, kinds of furnaces, the project's methods, and how to calculate the furnace's installation and operation costs are all given in Chapters IV, V and VI.

In Chapter VII, given steady flow heat transmission and some simplifying hypothesis, we developed a method for the computer calculation of furnace wall lining, starting with the calculation of the adiabatic temperature of combustion with this procedure we can obtain: the dimensions of the refractories and insulating materials which to be employed; heat flow; and the internal wall temperature. From the set of feasible linings, the program selects the one that presents a minimum cost.

Chapter VIII presents the program and solves a few sample problems.

Chapter IX presents conclusions and comments regarding the solution of sample problems. It also permits further comments upon a few possible lines of research for further developments.

Attached material and a bibliography can be found at the end of the paper.

## INDICE

Indice de figuras .....	i
Indice de tabelas .....	ii
Capítulo I	
Introdução .....	3
Capítulo II	
Um resumo sobre transmissão de calor em regime estacionário	
2.1 - Condução .....	5
2.2 - Convecção .....	9
2.3 - Radiação	
2.3.1 - Leis da radiação-Emissividade-Fator de Forma .....	12
2.3.2 - Radiação em Gases .....	21
Capítulo III	
Combustíveis	
3.1 - Definições .....	29
3.2 - Estudo da combustão .....	30
3.3 - Características e especificações de óleos combustíveis .....	32
3.4 - Análises dos combustíveis e dos produtos da combustão.....	34
Capítulo IV	
Refratários e Isolantes	
4.1 - Introdução .....	36
4.2 - Refratários .....	37
4.2.1 - Características dos refratários .....	38
4.2.2 - Seleção e uso de refratários .....	40
4.3 - Refratários isolantes.....	43
4.4 - Isolantes .....	44
4.5 - Disponibilidade no mercado .....	46



## Capítulo V

### Fornos

- 5.1 - Considerações iniciais sobre fornos ..... 50
- 5.2 - Uma classificação dos fornos ..... 51
- 5.3 - Informações complementares sobre fornos
  - 5.3.1 - Fundações e juntas de expansão ..... 57
  - 5.3.2 - Alguns esquemas construtivos ..... 58

## Capítulo VI

### Análise dos custos

- 6.1 - Custo de viabilidade técnica do forno ..... 69
- 6.2 - Custo de implantação ..... 70
- 6.3 - Custo de operação e de manutenção preventiva  
(pequenos reparos) ..... 70
- 6.4 - Custo dos refratários e isolantes ..... 71
- 6.5 - Custo de manutenção e grandes reparos ..... 72
- 6.6 - Custo de depreciação ..... 72
- 6.7 - Conclusões ..... 73

## Capítulo VII

### Métodos para o projeto de fornos

- 7.1 - Capacidade de aquecimento-Variáveis de projeto. 74
- 7.2 - Perdas em fornos ..... 76
- 7.3 - Quatro métodos para o projeto de fornos ..... 78
- 7.4 - Proposta de um método para o projeto de fornos  
com o uso do computador ..... 83

## Capítulo VIII

### O Programa de computador para o projeto de fornos

- 8.1 - O programa ..... 90
- 8.2 - O fluxograma ..... 94
- 8.3 - Aplicações ..... 96

## Capítulo IX

### Conclusões

Apêndice A	
Balanço energético da combustão.....	116
Apêndice B	
Temperatura adiabática de combustão .....	119
Apêndice C	
Condutibilidades térmicas dos refratários e isolantes.	126
Apêndice D	
Regressões .....	127
Apêndice E	
Preços dos refratários e combustíveis líquidos . ....	130
Apêndice F	
Fator de forma .....	132
Apêndice G	
Raio crítico .....	135
Apêndice H	
Conversão para o sistema internacional de unidades....	137
Apêndice I	
Listagem do programa .....	138
Referências bibliográficas .....	156



Fig. 1	Distribuição de temperaturas através de uma parede plana composta de três camadas .....	7
Fig. 2	Condução de calor em paredes cilíndricas de duas camadas .....	8
Fig. 3	Efeito da temperatura sobre a emissividade das superfícies .....	15
Fig. 4	Fluxos radiantes num elemento de superfície.....	16
Fig. 5	Interações radiantes entre dois elementos de superfície .....	18
Fig. 6	Emissividade do gás carbônico .....	23
Fig. 7	Emissividade do vapor d'água .....	23
Fig. 8	Fator de correção para o gás carbônico .....	24
Fig. 9	Fator de correção para o vapor d'água .....	24
Fig. 10	Correção para o gás constituído de gás carbônico e vapor d'água .....	25
Fig. 11	Gradiente de temperatura em paredes de fornos ....	37
Fig. 12	Forno de aquecimento por lote .....	51
Fig. 13	Forno contínuo .....	51
Fig. 14	Corte de forno contínuo de descarga lateral .....	51
Fig. 15	Forno contínuo com soleira giratória .....	52
Fig. 16	Forno contínuo com transportador helicoidal .....	52
Fig. 17	Forno de soleira móvel .....	52
Fig. 18	Forno de aquecimento inferior .....	53
Fig. 19	Forno de aquecimento lateral .....	53
Fig. 20	Forno de aquecimento superior .....	53
Fig. 21	Forno de recirculação .....	54
Fig. 22	Forno de recuperação .....	55
Fig. 23	Forno de regeneração .....	55
Fig. 24	Forno túnel .....	56
Fig. 25	Forno de fusão por indução com núcleo.....	56

Fig. 26	Forno de fusão sem núcleo .....	56
Fig. 27	Construções típicas de juntas de expansão em fornos	59
Fig. 28	Forno vagoneta para tratamento térmico .....	60
Fig. 29	Forno elétrico de fusão de cobre .....	62
Fig. 30	Forno de indução de baixa frequência .....	63
Fig. 31a	Forno elétrico de fusão de aço .....	64
Fig. 31b	Conversor de cobre .....	65
Fig. 31c	Alto forno .....	66
Fig. 32	Eficiência ideal e real de fornos industriais intermitentes .....	69
Fig. 33	Fluxo calorífico em fornos .....	76
Fig. 34	Fluxo calorífico em soleiras .....	77
Fig. 35	Método gráfico para calcular as perdas caloríficas através de paredes homogêneas .....	82
Fig. 36	Método gráfico para calcular as perdas caloríficas através de paredes compostas .....	82
Fig. 37	Distribuição de temperaturas através de parede plana composta .....	86
Fig. 38	Convenções para o relatório de saída do computador.	93
Fig. 39	Fluxograma .....	95
Fig. 40	Temperatura adiabática de combustão .....	119
Fig. 41	Combustão do álcool etílico .....	121
Fig. 42	Representação esquemática para determinação do fator de forma .....	132
Fig. 43	Fator de forma para discos e retângulos paralelos..	134
Fig. 44	Fator de forma para dois retângulos perpendiculares com lado comum .....	134
Fig. 45	Fator de forma para cilindros concêntricos .....	134
Fig. 46	Efeito da relação de raios sobre a transmissão de calor através de paredes cilíndricas simples .....	135



INDICE DAS TABELAS

Tabela I	- Condutibilidade térmica dos refratários e isolantes em função da temperatura.....	6
Tabela II	- Emissividade de algumas superfícies.....	14
Tabela IIIa	- Capacidades caloríficas molares médias de gases a pressão constante.....	31
Tabela IIIb	- Poder calorífico molar dos combustíveis gasosos a pressão constante.....	31
Tabela IV	- Características dos óleos combustíveis.....	34
Tabela V	- Formatos e dimensões padronizados de alguns refratários.....	47
Tabela VIa	- Características físicas de alguns refratários e refratários isolantes fabricados no Brasil.....	48
Tabela VIb	- Propriedades físicas de alguns isolantes fabricados no Brasil.....	49
Tabela VII	- Algumas combinações de revestimentos usados em fornos .....	80
Tabela VIII	- Alguns refratários e isolantes empregados no revestimento de fornos .....	80a
Tabela IX	- Variação da condutibilidade térmica de alguns refratários em função da temperatura .....	126
Tabela X	- Preços de alguns refratários e isolantes .....	130
Tabela XI	- Fórmulas para o cálculo do fator de forma .....	133

## CAPITULO I

### INTRODUÇÃO

Atualmente, num mercado competitivo e numa é poca de escassez de combustível, deve-se procurar aproveitar o máximo possível à energia disponível, com o mínimo dispêndio em instalações e equipamentos, e que mesmo assim, ainda garanta a operação do sistema nas melhores condições possíveis.

Este trabalho apresenta um método de cálculo para o dimensionamento do revestimento de fornos a combustão. São consideradas as interações térmicas entre o revestimento do forno, a carga e o meio exterior. O dimensionamento objetiva:

- atender às condições tecnológicas, isto é, o material empregado deverá suportar as condições de trabalho;
- obter o mínimo custo no revestimento refratário e iso - lante, mantendo o menor possível as perdas caloríficas.

Para aplicar o método desenvolveu-se um programa de computador, que também será apresentado.

O trabalho foi dividido em oito capítulos, além desta Introdução.

No segundo capítulo apresenta-se um resumo de transmissão de calor em regime estacionário, estudando-se: condução, convecção, radiação em múltiplas superfícies, e radiação em gases não luminosos.

No terceiro capítulo estuda-se os combustíveis e alguns aspectos da combustão.

No quarto capítulo analisa-se os refratários: suas classificações, suas características, seu emprego; refratários isolantes; e isolantes.

No quinto capítulo apresenta-se os fornos, suas classificações e alguns tipos de revestimentos de fornos.



No sexto capítulo discute-se os custos envolvidos no projeto, na instalação e na operação de fornos.

No sétimo capítulo apresenta-se o modelo matemático do projeto de um forno baseado nos resultados obtidos nos capítulos precedentes. A título de ilustração apresenta-se outros métodos de cálculos usados para o dimensionamento do revestimento de fornos.

No oitavo capítulo são feitas considerações a respeito do programa de computador, e apresentados exemplos de cálculo.

No nono capítulo são apresentadas algumas conclusões sobre o método e o programa, bem como algumas sugestões para futuros desenvolvimentos.

A listagem do programa e suas sub-rotinas acham-se no apêndice I.

Os outros apêndices visam complementar algumas explicações dos capítulos anteriores.

No texto os números entre colchetes referem-se à bibliografia apresentada no fim do trabalho.

Por fugir ao escopo do trabalho não será analisado o dimensionamento estrutural do forno.

Por razões técnicas, manteve-se as unidades usuais de medidas nos primeiros sete capítulos.

O programa de computador (capítulo oito) necessita de informações no Sistema Internacional de Unidades, e os resultados são impressos no mesmo sistema.

Com a finalidade de dar maior facilidade no uso, no anexo H estão algumas fórmulas, denotadas no texto por \*, já convertidas para o Sistema Internacional de Unidades.

## CAPITULO II

UM RESUMO SOBRE TRANSMISSÃO DE CALOR EM REGIME ESTACIONÁRIO

No processo de aquecimento de cargas em fornos podem ser significativas as várias formas de transmissão de calor: condução, convecção e radiação. Uma hipótese simplificadora no estudo de fornos é a de regime estacionário, isto é, - quando o calor transmitido não depende do tempo e a temperatura em cada ponto não varia.

Por isso, apresentamos neste capítulo um resumo sobre os fundamentos teóricos da transmissão de calor em regime estacionário.

2.1 - CONDUÇÃO

Conforme [45] pode-se definir condução como o fluxo térmico de uma região de temperatura mais alta para outra de temperatura mais baixa, dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato físico direto.

Considere um corpo onde:  $dT$  é a diferença de temperaturas entre sua face quente e sua face fria;  $dx$  é a distância medida na direção do fluxo calorífico entre as faces;  $A$  é a área da superfície medida normalmente ao fluxo térmico. Admite-se que o fluxo térmico por unidade de área, normal ao fluxo, é proporcional ao gradiente térmico através da superfície. Esta asserção constitui a chamada Lei de Fourier:

$$dQ = - KA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

onde, o sinal negativo indica que o fluxo de calor tem sentido contrário ao do gradiente térmico, e a constante de proporcionalidade (K) é denominada condutibilidade térmica do material.

A condutibilidade térmica varia com a tempe-



ratura, sendo que para a maioria dos materiais homogêneos esta variação pode ser considerada linear, isto é

$$K_t = K_o (1 + at) \quad (2)$$

No caso da variação linear, dadas as temperaturas  $t_1$  e  $t_2$ , a condutibilidade média é:

$$K = \frac{K_{t_1} + K_{t_2}}{2} \quad (3)$$

isto é, a condutibilidade térmica do material é função da média de temperaturas de suas faces extremas. Na tabela I são apresentadas as condutibilidades térmicas de alguns materiais refratários e refratários isolantes em função da temperatura.

Outras características dos materiais designados por 1, 2, etc, serão apresentados no Capítulo IV conservando o mesmo código.

Código	Temperatura (°C)									
	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200	
refratários	1		1,00		1,12		1,15	1,19	1,20	1,24
	2		1,08		1,16		1,18	1,20	1,22	1,25
	3		1,17		1,20		1,22	1,23	1,25	1,27
	4		1,43		1,33		1,25	1,24	1,25	1,31
	5		1,89		1,69		1,51	1,48	1,46	1,46
	6		2,35		2,05		1,78	1,73	1,67	1,65
	7		0,89		0,97		1,04	1,12	1,22	1,35
	8		0,16		0,21		0,24	0,28	0,30	—
	9		0,25		0,28		0,31	0,35	0,38	—
	10		0,35		0,39		0,43	0,47	0,52	0,55
	11		0,45		0,51		0,55	0,60	0,67	0,70
	12		0,57		0,53		0,48	0,47	0,49	0,51
isolantes	Is1	0,041	0,067	0,105	0,174	—	—	—	—	—
	Is2	—	0,066	0,077	0,092	0,114	0,136	—	—	—
	Is3	0,047	0,062	0,094	0,130	—	—	—	—	—
	Is4	—	—	0,056	0,072	0,077	0,087	0,124	0,164	0,200
	Is5	0,025	0,037	0,047	0,062	0,084	0,099	0,151	0,211	—
	Is6	0,027	0,047	0,050	0,072	0,100	0,120	0,176	0,255	—

TABELA I Condutibilidade térmica (kcal/h m °C) dos refratários e isolantes em função da temperatura (°C).

Para calcular o fluxo térmico total que atravessa uma parede de espessura  $x$ , integra-se a equação (1), supondo: regime estacionário, variação linear da condutibilidade térmica com a temperatura, continuidade de temperatura nas interfaces e inexistência de fontes ou sorvedoures caloríficos nas camadas ou nas interfaces.

A figura 1 esquematiza a distribuição de temperaturas na situação de paredes planas compostas.

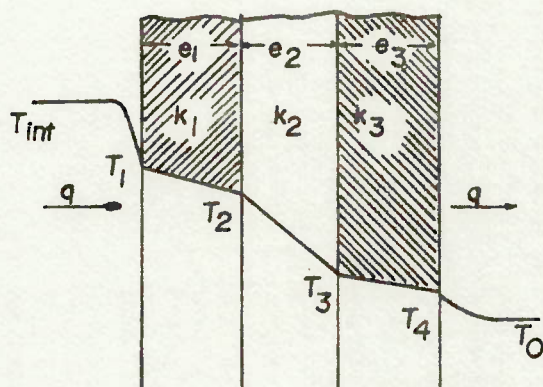


Fig. 1 Distribuição de temperaturas para a transmissão de calor  $q$  através de uma parede plana composta de três camadas

No caso de paredes planas, integrando a equação (1), com auxílio de (2) e (3) e considerando-se as hipóteses adotadas, obtém-se:

$$T_1 - T_2 = \frac{e_1 Q}{K_1 A} \quad (4a)$$

$$T_2 - T_3 = \frac{e_2 Q}{K_2 A} \quad (4b)$$

$$\dots$$

$$T_{n-1} - T_n = \frac{e_{n-1} Q}{K_{n-1} A} \quad (4n)$$



Somando-se as equações (4a), (4b), ..., (4n) e modificando-se convenientemente a equação resultante, obtém-se:

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{T_1 - T_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{e_i}{K_i}} \quad (5)$$

A figura 2 esquematiza a condução em parede cilíndrica composta:

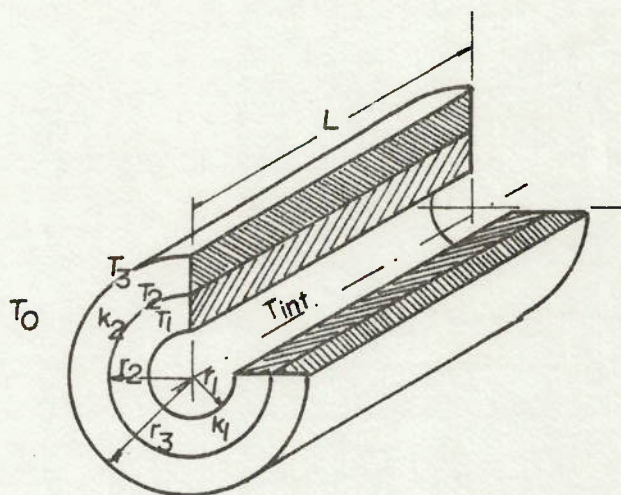


Fig.2 Esquema ilustrativo da nomenclatura para condução de calor em paredes cilíndricas de duas camadas

No caso de paredes cilíndricas, integrando a equação (1), com o auxílio de (2) e (3), sendo  $A = 2\pi rL$ , onde L é a altura do cilindro e considerando-se as mesmas hipóteses do item anterior, obtém-se:

$$T_1 - T_2 = \frac{Q \ln(r_2/r_1)}{2\pi K_1 L} \quad (6a)$$

$$T_2 - T_3 = \frac{Q \ln(r_3/r_2)}{2\pi K_2 L} \quad (6b)$$

$$T_{n-1} - T_n = \frac{Q \ln(r_n/r_{n-1})}{2\pi K_{n-1} L} \quad (6n)$$

Somando-se as equações (6a), (6b), ..., (6n) obtém-se:

$$q = \frac{Q}{2\pi r_n L} = \frac{T_1 - T_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{r_n}{K_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \quad (7)$$

As equações (5) e (7) representam o fluxo calorífico em regime estacionário por unidade de área que atravessa respectivamente as paredes esquematizadas nas figuras 1 e 2.

O revestimento de um forno pode ser descrito ou como uma associação de paredes planas, e se utiliza a equação (5), ou como uma associação de cilindros concêntricos, e se utiliza a equação (7).

## 2.2 - CONVECÇÃO

A convecção é a troca de calor devida ao movimento macroscópico de partículas fluídas, movimento causado ou pela diferença de densidade resultante do gradiente térmico no fluido (convecção natural), ou pelo movimento do fluido provocado por meios mecânicos (convecção forçada) [45].

Considere-se um corpo cuja temperatura superficial é  $T_s$ , cuja área superficial é  $A$ , e que está em contato com um fluido cuja temperatura em pontos suficientemente afastados do corpo é  $T_\infty$ . Nesta situação o fluxo térmico por unidade de área transmitido por convecção entre o contorno sólido e o fluido é calculado por:

$$q = \frac{Q}{A} = h(T_s - T_\infty) \quad (8)$$



onde  $h$  é o coeficiente médio de transmissão de calor por convecção (também denominado coeficiente de película). Tal coeficiente é função do escoamento do fluido; das propriedades térmicas do meio fluido; e da geometria do sistema.

Existem quatro métodos gerais disponíveis para avaliar os coeficientes de transmissão de calor |42|:

- a) análise dimensional combinada com a experiência;
- b) soluções matemáticas exatas das equações da camada limite;
- c) análise aproximada da camada limite por métodos integrais, e
- d) analogia entre transferência de massa e de quantidade de movimento.

As referências |34|, |38|, |42|, |45|, entre outras contém exposições específicas sobre as técnicas de avaliação do coeficiente de transmissão de calor por convecção.

Apresentam-se a seguir alguns resultados de interesse no projeto de fornos. |42|, |45|.

Equações simplificadas para o ar a 20°C e pressão atmosférica normal.

#### I - Convecção natural

a) planos e cilindros verticais

$$h = 1,4171 (\Delta T/L)^{0,25} \quad \text{se } 10^4 \leq Gr \leq 10^9$$

$$h = 1,3120 (\Delta T)^{1/3} \quad \text{se } 10^9 \leq Gr \leq 10^{12} \quad (9)$$

b) cilindros horizontais

$$h = 1,3193 (\Delta T/D)^{0,25} \quad \text{se } 10^3 \leq Gr \leq 10^9$$

$$h = 1,2430 (\Delta T)^{1/3} \quad \text{se } 10^9 \leq Gr \leq 10^{12} \quad (10)$$

c) placas horizontais

c.1 plano superior

$$h = 1,3193 (\Delta T/D)^{0,25} \quad \text{se } 10^5 \leq Gr \leq 2 \cdot 10^7$$

$$h = 1,5192 (\Delta T)^{1/3} \quad \text{se } 2 \cdot 10^7 \leq Gr \leq 3 \cdot 10^{10} \quad (11)$$

c.2 plano inferior

$$h = 0,5900 (\Delta T/L)^{0,25} \quad \text{se } 3 \cdot 10^5 \leq \text{Gr.Pr} \leq 3 \cdot 10^{10} \quad (12)$$

II - Convecção forçada

a) internamente a tubos

$$\text{Nu} = 0,020 \cdot \text{Re}^{0,8} \quad \text{se } \text{Re} \leq 4000 \quad (13)$$

b) externamente a tubos

$$\text{Nu} = 0,24 \cdot \text{Re}_{\text{Máx}}^{0,6} \quad \text{se } 10^3 \leq \text{Re} \leq 10^6 \quad (14)$$

c) sobre planos

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 0,612 \text{Re}^{0,5} && \text{se } \text{Re} < 4 \cdot 10^5 \\ \text{Nu} &= 0,036 |\text{Re}^{0,8} - 18700| && \text{se } \text{Re} > 4 \cdot 10^5 \end{aligned} \quad (15)$$

Nestas equações  $L$  é um comprimento característico em metros;  $\Delta T$  é a diferença de temperaturas entre o fluido e a superfície do corpo em  $^{\circ}\text{C}$ ;  $D$  é o diâmetro do cilindro em metros;  $\text{Gr}$ ,  $\text{Pr}$ ,  $\text{Nu}$  e  $\text{Re}$  são números adimensionais respectivamente denominados por número de: Grashoff, Prandtl, Nusselt e Reynolds; sendo que:

$$\text{Gr} = \frac{g\beta L^3 \Delta T}{\nu^2} = \frac{\text{força de empuxo}}{\text{força viscosa}}$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{K} = \frac{\text{viscosidade cinemática do fluido}}{\text{difusividade térmica}}$$

$$\text{Nu} = \frac{hL}{K} = \frac{\text{gradiente de temperatura no fluido imediatamente em contato com a superfície}}{\text{gradiente de temperatura de referência}}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{\text{força de inércia}}{\text{força viscosa}}$$

onde:  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );  
 $\beta$  coeficiente de dilatação volumétrica ( $\text{K}^{-1}$ );  
 $\nu$  viscosidade cinemática ( $\text{Ns/m}$ );  
 $\mu$  viscosidade dinâmica ( $\text{Ns/m}^2$ );  
 $c_p$  calor específico a pressão constante ( $\text{Joules/kgK}$ );



K condutibilidade térmica (watts/m K);  
 h coeficiente de película (watts/m<sup>2</sup>K); e  
 V velocidade de escoamento do fluido (m/s).

Nos fornos com temperaturas inferiores a 600°C, a transmissão de calor por convecção se reveste da maior importância, pois nestes tipos de fornos é comum empregar-se ventiladores para melhorar o fluxo de calor entre os gases e a carga.

Em fornos que operam a temperaturas mais altas é comum desprezar-se os efeitos da convecção no interior do forno, em face dos efeitos preponderantes devido à radiação.

No estudo do fluxo calorífico da face fria do forno para o meio exterior deve-se considerar tanto a convecção como a radiação.

### 2.3 - RADIAÇÃO

Estudam-se a seguir as leis que regem a radiação; o fator de forma; a radiação em gases; e a radiação num compartimento que contém um gás cinzento.

#### 2.3.1 - Leis da Radiação-Emissividade-Fator de Forma

Qualquer corpo emite energia radiante em todas as direções.

A energia radiante emitida pelo corpo depende da quarta potência de sua temperatura, enquanto que o fluxo de calor por condução e convecção dependem do gradiente térmico nos elementos considerados ou da diferença de temperatura entre as partes que interagem. Segue-se que a convecção e a condução são fenômenos predominantes a baixas temperaturas, enquanto que a radiação prevalece nas altas temperaturas.

Quando a energia radiante atinge outro corpo, parte pode ser refletida, parte pode ser transmitida através do corpo (corpo diatérmico), e o restante será absorvido.

No estudo da radiação são importantes as chamadas "Lei de Kirchoff" e "Lei de Stefan-Boltzman".

Diz a Lei de Kirchoff que dois corpos colocados num recinto, com isolação externa perfeita, estão em equilíbrio térmico quando a energia emitida for igual à energia absorvida por cada corpo. A mesma Lei de Kirchoff também pode ser enunciada da seguinte forma |42|: "No equilíbrio térmico a energia emitida por um corpo é igual à energia absorvida por este mesmo corpo."

Chama-se emissividade ( $\epsilon$ ) à relação entre a energia emitida por um corpo e a energia emitida por um radiador perfeito (corpo negro). A Lei de Kirchoff limita a emissividade ( $\epsilon$ ) de um corpo; assim, o corpo negro tem emissividade unitária; outros corpos, que não são corpos negros, têm emissividade ( $\epsilon$ ) menor que a unidade.

Chama-se absorptância ( $\alpha$ ) de uma superfície à porcentagem da radiação total incidente sobre esta superfície e que é absorvida |42|.

Todo corpo que tem emissividade menor que a unidade, cuja absorptância ( $\alpha$ ) é igual à sua emissividade ( $\epsilon$ ), será denominado de corpo cinzento.

Chama-se potência emissiva de uma superfície negra à radiação térmica total emitida ao longo de todo o espectro de comprimentos de onda |42|.

A Lei de Stefan-Boltzman afirma que a potência emissiva do corpo negro depende só de sua temperatura:

$$E = \sigma T^4 \quad (16)$$

onde, o coeficiente de proporcionalidade  $\sigma$  é chamado de constante de Stefan-Boltzman ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  watts/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>).

A emissividade  $\epsilon$  varia com a temperatura da superfície, com o grau de rugosidade desta superfície e com o grau de oxidação do material.

A tabela II apresenta valores típicos da emissividade de algumas superfícies.



SUPERFÍCIE	T <sup>o</sup> C	EMISSIVIDADE
Alumínio		
Polido	30 - 1500	0,04 - 0,19
Oxidado	30 - 500	0,11 - 0,18
Anodizado	30 - 1500	0,94 - 0,34
Cobre		
Polido	30 - 1500	0,04 - 0,17
Oxidado	30 - 500	0,87 - 0,77
Cromo		
Polido	30 - 1500	0,08 - 0,26
Ferro		
Polido	30 - 1500	0,06 - 0,25
Fundido, oxidado	30 - 500	0,63 - 0,76
Galvanizado, novo	30 - 1500	0,23 - 0,42
Galvanizado, enferrujado	30	0,28
Prata		
Polido	30 - 500	0,01 - 0,03
Zinco		
Polido	30 - 1500	0,02 - 0,06
Tijolo		
De alvenaria	30	0,93
Refratário	30 - 1500	0,9 - 0,75
Silício	30 - 1500	0,9 - 0,84
De magnésio	30 - 1500	0,9 - 0,4
Marmore		
Branco	30	0,95
Tinta		
Laca preta	30 - 250	0,96 - 0,98
Laca aluminizada	30 - 250	0,65

**TABELA II** - Emissividade de algumas superfícies para certos intervalos de temperatura.

A figura 3 mostra a variação da emissividade de alguns materiais em função de sua temperatura.

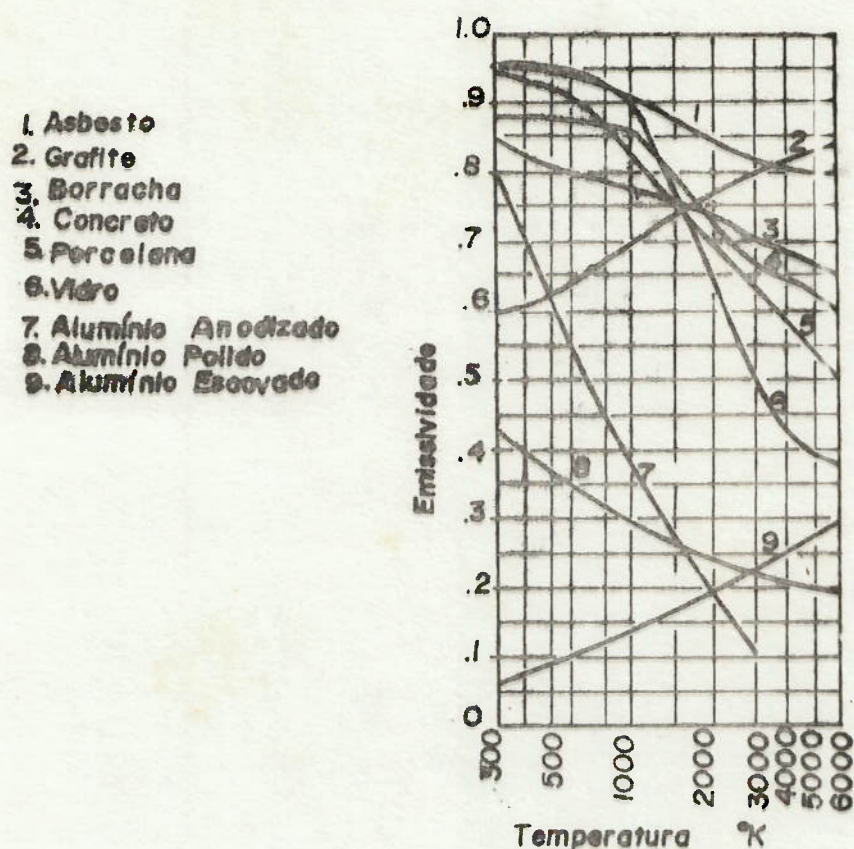


Fig. 3 Efeito da temperatura sobre a emissividade das superfícies relacionadas ao lado.

No estudo da transmissão por radiação entre várias superfícies finitas, a diferentes temperaturas, é essencial considerar-se suas interações mútuas, o que é feito através de um fator de forma geométrico  $F$ .

Define-se o fator de forma  $F_{12}$  como sendo a fração de radiação emitida pela superfície de área  $A_1$  e que é interceptada pela superfície de área  $A_2$ .

O fator de forma obedece às relações:

$$\begin{aligned}
 \text{a) } \sum_{j=1}^n F_{ij} &= 1 & \left\{ \begin{array}{l} n = \text{n}^\circ \text{ de superfícies} \\ i = 1, 2, 3, \dots, n \end{array} \right. \\
 \text{b) } A_i F_{ij} &= A_j F_{ji} & (17)
 \end{aligned}$$



O fator de forma  $F$  depende das formas, das dimensões e da disposição das superfícies envolvidas.

As figuras e fórmulas que se encontram no apêndice  $F$  possibilitam a avaliação do fator  $F$  para situações que ocorrem frequentemente em fornos. |25|, |45|, |56|, |62|.

O fluxo calorífico líquido devido à radiação entre dois corpos negros pode ser obtido a partir de (16) e (17):

$$q_{1\rightarrow 2} = E_{B1} A_1 F_{12} - E_{B2} A_2 F_{21} = A_1 F_{12} \sigma T_1^4 - A_2 F_{21} \sigma T_2^4$$

e, portanto:

$$q_{1\rightarrow 2} = A_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (18)$$

Considere-se, agora um elemento de superfície cinzenta à temperatura  $T$ . (figura 4).

Chama-se radiação incidente  $H$  à energia radiante que incide sobre a superfície do corpo.

Chama-se radiação refletida ( $R$ ) à parcela da energia radiante que incide sobre a superfície e que é refletida, isto é, volta para o meio de que proveio. A porcentagem da energia refletida com relação à incidente é denominada refletância e simbolizada por  $\rho$ . Portanto  $R = \rho H$ .

Chama-se energia radiante emissiva ( $W$ ) de uma superfície cinzenta à energia que emerge desta superfície, que como mostra a figura 4 é composta de duas parcelas: uma é a energia radiante ( $\epsilon E$ ) da superfície, outra é a radiação refletida  $H$ .

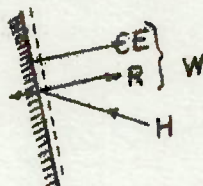


Fig. 4 Fluxos radiantes num elemento de superfície

Portanto :

$$W = \epsilon E + R \quad (19a)$$

$$W = \epsilon E + \rho H \quad (19b)$$

Da equação (19b) resulta que a energia radiante incidente sobre a superfície é

$$H = \frac{W - \epsilon E}{\rho} \quad (20)$$

O fluxo radiante líquido (Q) que é emitido pela superfície cinzenta, no equilíbrio térmico, é:

$$Q = W - H \quad (21a)$$

$$Q = (\epsilon E + \rho H) - H = \epsilon(E-H) \quad (21b)$$

$$= \epsilon \left( E - \frac{R}{\rho} \right) = W - (W - \epsilon E) \frac{1}{\rho}$$

Assim,

$$Q = \frac{\epsilon}{\rho} (E - W) \quad (21c)$$

A equação (21c) permite calcular o fluxo líquido por radiação.

No estudo de radiação em fornos deve-se analisar o efeito global das interações das várias superfícies. Em tal análise, é conveniente que se divida cada superfície num número de zonas, que se possa admitir como tendo emissividade e temperaturas uniformes. Como ilustra a figura 5, pode-se escrever:



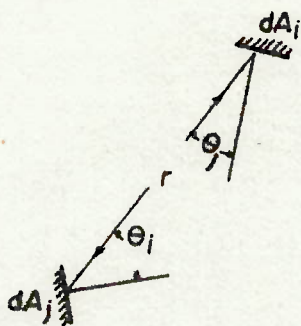


Fig. 5 Interação radiante  
entre dois elemen-  
tos de superfície

$$H_j = \sum_i W_i \left( \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} \right) A_i \quad \begin{array}{l} j = \text{superfície analisada} \\ (j = 1, 2, \dots, n) \\ i = 1, 2, 3, \dots, n \text{ superfícies} \\ \text{emissivas} \end{array} \quad (22a)$$

isto é,

$$\frac{W_j - \epsilon_j E_j}{\rho_j} = \sum_i W_i \frac{F_{ij}}{A_i} A_i \quad (22b)$$

$$A_j \frac{W_j - \epsilon_j E_j}{\rho_j} = \sum_i W_i \frac{\overline{s_i s_j}}{A_i} A_i$$

$$A_j \frac{W_j - \epsilon_j E_j}{\rho_j} = \sum_i W_i \overline{s_i s_j} \quad (22c)$$

Existindo  $n$  zonas, existem  $n$  equações do tipo (22c), resultando um sistema de equações lineares em  $W$ .

Pode-se modificar a forma da equação (22c) para a seguinte:

$$\sum_i \left( \overline{s_i s_j} - \delta_{ij} \frac{A_j}{\rho_j} \right) W_i = -A_j \frac{\epsilon_j}{\rho_j} E_j \quad \begin{array}{l} j = 1, 2, 3, \dots, n \\ i = 1, 2, 3, \dots, n \end{array} \quad (23)$$

que em notação matricial fica:

$$\begin{bmatrix} \overline{s_1 s_1} - \frac{A_1}{\rho} & \overline{s_1 s_2} & \overline{s_1 s_3} & \dots \\ \overline{s_1 s_2} & \overline{s_2 s_2} - \frac{A_2}{\rho} & \overline{s_2 s_3} & \dots \\ \overline{s_1 s_3} & \overline{s_2 s_3} & \overline{s_3 s_3} - \frac{A_3}{\rho} & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{A_1 \epsilon_1}{\rho_1} E_1 \\ -\frac{A_2 \epsilon_2}{\rho_2} E_2 \\ -\frac{A_3 \epsilon_3}{\rho_3} E_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (24)$$

ou  $M_T \cdot V_R = V_E$

onde  $M_T$  é a matriz de transferência

$V_R$  é o vetor resposta

$V_E$  é o vetor excitação

A troca térmica líquida numa superfície  $i$  obtém-se da equação (21c).

O fluxo térmico líquido entre duas superfícies é calculado por

$$Q_{j \rightarrow i} = \frac{A_i \epsilon_i}{\rho_i} \left( \frac{j W_i}{E_j} - \delta_{ij} \epsilon_j \right) (E_j - E_i) \quad (25a)$$



$$Q_{j \rightarrow i} = \frac{A_j \epsilon_j}{\rho_j} \left( \frac{{}_j W_i}{E_i} - \delta_{ij} \epsilon_i \right) (E_j - E_i) \quad (25b)$$

onde  ${}_j W_i$  é a energia emissiva da superfície  $j$  para a superfície  $i$ .

Pode-se resolver a equação (24) pela aplicação da regra de Cramer, isto é:

$$W_i = \frac{D_i}{D} \quad (26)$$

onde  $D$  é o determinante da matriz de transferência, e  $D_i$  é o determinante da matriz de transferência, quando se substitui sua  $i$ -ésima coluna pelo vetor excitação.

O cálculo do fluxo calorífico líquido entre as superfícies  $i$  e  $j$  é obtido em termos de  ${}_j W_i$ . Se na equação (24) todos  $E_i$ , exceto  $E_j$ , são igualados a zero, obtém-se  ${}_j W_i$  (fluxo radiante emergente da superfície  $j$  que incide na superfície  $i$ ) em termos de  $D_i/D$ .

Substituindo-se o vetor excitação assim formado na  $i$ -ésima coluna da matriz de transferência, a ordem do determinante fica reduzido de uma unidade, pois todos  $E_i$ , exceto  $E_j$ , foram igualados a zero. Então, resulta

$${}_j W_i = \frac{A_j \epsilon_j}{\rho_j} E_j \left( -\frac{D'_{ij}}{D} \right) \quad (27)$$

onde  $D'_{ij}$  é o cofator do elemento que ocupa a  $i$ -ésima coluna e a  $j$ -ésima linha da matriz de transferência.

Pode-se então transformar a equação (25a) na seguinte:

$$Q_{j \rightarrow i} = \frac{A_i \epsilon_i}{\rho_i} \left| \frac{A_j \epsilon_j}{\rho_j} \left( -\frac{D'_{ij}}{D} \right) - \delta_{ij} \epsilon_j \right| (E_j - E_i) \quad (28)$$

### 2.3.2 - Radiação em Gases

O fluxo térmico radiante em fornos a combustão é proveniente da interação entre os produtos da combustão, a carga e a superfície interna do forno.

Chama-se incandescência às partículas sólidas luminosas existentes na queima de combustíveis.

Segundo [45] a incandescência produz a luminosidade da chama, isto é, luminosidade de gases puros muito quentes e quase invisíveis.

Geralmente a queima de combustíveis gasosos fornece chamas não luminosas, isto é, há ausência de partículas incandescentes. Os combustíveis líquidos ao serem queimados fornecem chamas com vários graus de luminosidade. A chama depende do desenho do queimador, do tipo de atomização e do excesso de ar empregado na combustão. Os combustíveis sólidos produzem chamas incandescentes.

Existem vários métodos para se calcular o calor produzido na queima de combustíveis em fornos. Alguns desses métodos são aplicáveis a fornos que queimam combustíveis líquidos ou gasosos, e outros métodos se aplicam na combustão de combustíveis sólidos. Deve-se ressaltar que infelizmente não existe um método simples de cálculo aplicável a todos os tipos de fornos.

O cálculo no caso de chamas luminosas requer informações experimentais. Algumas informações podem ser obtidas em [26].

Considere-se a situação de um forno a combustão que opere com chamas não luminosas.

Admite-se que os produtos da combustão estão em temperatura uniforme e que emitem radiação em quantidades apreciáveis.

A radiação dos gases puros não segue a lei da quarta potência da temperatura, exceto com o artifício de se



considerar sua emissividade variável com a temperatura |25|. Os únicos gases puros que possuem apreciável fluxo térmico radiante são os que possuem três ou mais átomos por molécula |25|. São exemplos típicos  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ , amônia, álcoois e os hidrocarbonetos. O monóxido de carbono, ainda que diatômico, também produz alguma radiação.

Os gases reais não emitem radiação em todos os comprimentos de onda, como ocorre com os sólidos. Ao contrário, os gases emitem radiações em comprimentos de onda bem definidos. (Este é o motivo pelo qual a radiação dos gases não segue a lei da quarta potência) |25|.

A radiação dos gases depende de sua temperatura, composição química, pressão, forma e espessura da camada do gás.

Os cálculos de transmissão de calor dos gases puros radiantes para sólidos e vice-versa são obtidos experimentalmente. Alguns destes dados são apresentados em tabelas e gráficos. Por exemplo, há gráficos que fornecem a emissividade do gás em função da temperatura, da pressão parcial e espessura da camada do gás, entendida a espessura da camada do gás como a relação entre o volume e a área total das faces da câmara de combustão, multiplicado pelo fator empírico 3,5. Ver |25|, |35|.

São exemplos destes gráficos as figuras 6 e 7.

A figura 6 (baseada em 25) apresenta a variação da emissividade do gás carbônico (avaliado à pressão total  $P_T$  de uma atmosfera) em função da temperatura do gás e do produto da pressão parcial do gás pela espessura da camada do gás.

A figura 7 (baseada em 45), mostra a variação da emissividade do vapor d'água ( $\epsilon_a$ ) (avaliado numa situação idealizada onde a pressão do vapor d'água  $-P_a$  - é zero atmosferas e a pressão total  $P_T$  é de uma atmosfera) em função do produto temperatura do gás e espessura da camada do gás.

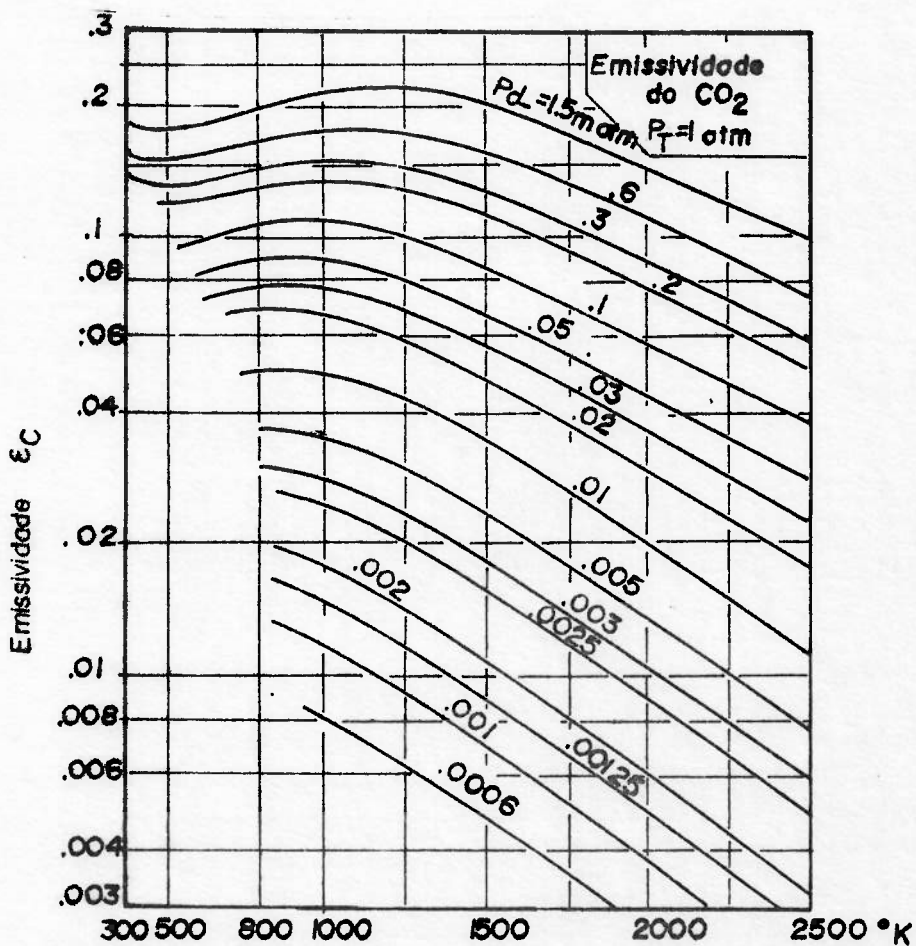


Fig. 6 Emissividade do CO<sub>2</sub> a 1 atm.(pressão total)

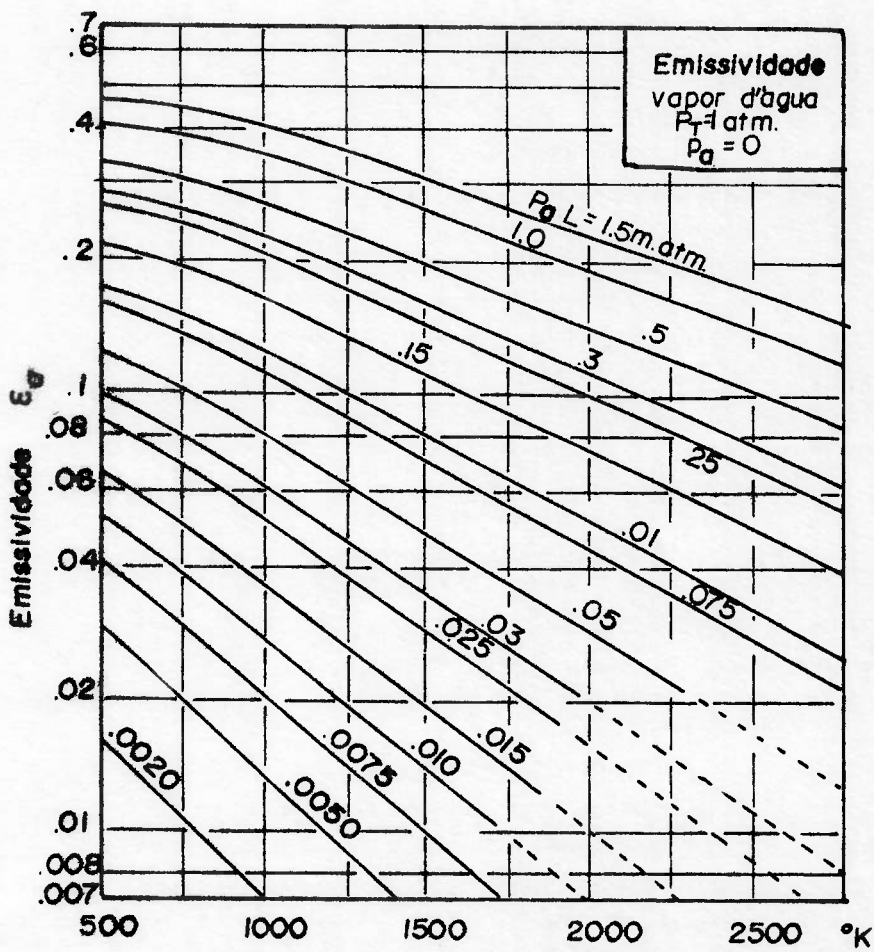


Fig. 7 Emissividade do vapor d'água à pressão P=1 atm. e reduzido à pressão P<sub>a</sub>=0 atm.



Se a pressão total do gás difere do valor tabelado, os resultados obtidos nas figuras 6 e 7 devem ser multiplicados por um fator de correção. A figura 8 fornece o fator de correção ( $C_c$ ) para o gás carbônico em função da pressão total. |25|, |27|.

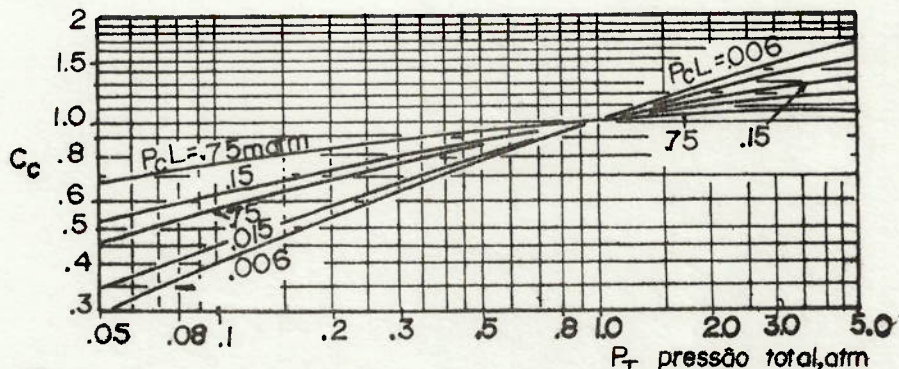


Fig. 8 Fator de correção  $C_c$  para converter a emissividade do  $CO_2$  de latm para pressão  $P_T$  atm

A figura 9 fornece o fator de correção ( $C_d$ ) para o vapor d'água em função da semi-soma de sua pressão total e pressão parcial |25|.

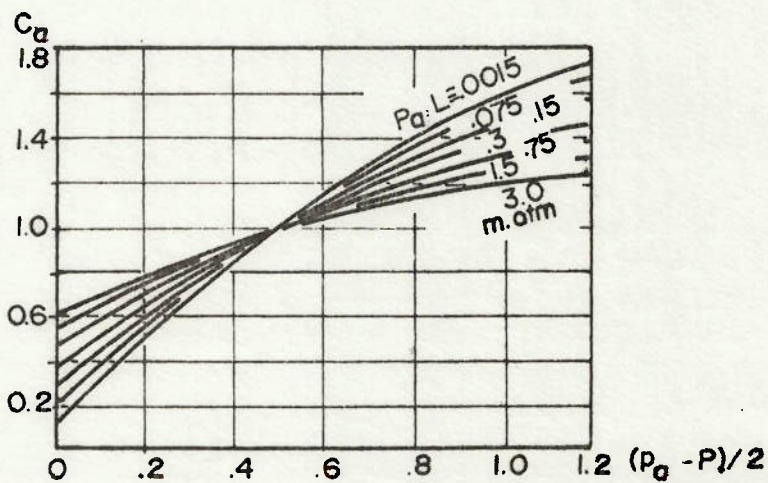


Fig. 9 Fator de correção  $C_d$  para converter a emissividade do vapor de água da pressão  $p_0 = 0$  e  $P = 1$  a pressão  $(p_0 + P)/2$ . atm.

A absorvância do gás carbônico ( $\alpha_c$ ) é dado por

$$\alpha_a = \epsilon_{a, T_1, P_a, L, \frac{T_1}{T_2}} \cdot \left( \frac{T_G}{T_1} \right)^{0,65} \cdot C_C \quad (29)$$

onde  $T_G$  é a temperatura do gás e  $T_1$  a temperatura da superfície emissiva [25].

A absorvância do vapor d'água ( $\alpha_a$ ) é calculada do por

$$\alpha_a = \epsilon_{a, T_1, P_a, L, \frac{T_1}{T_G}} \cdot \left( \frac{T_G}{T_1} \right)^{0,45} \cdot C_a \quad (30)$$

Em situações onde o gás é constituído por dióxido de carbono e vapor d'água a radiação total oriunda da presença de ambos é menor que a soma dos efeitos em separado, devido à opacidade dos gases. O fator corretivo  $\Delta\epsilon$  a ser subtraído da soma  $\epsilon_c$  (gás carbônico) e  $\epsilon_a$  (vapor d'água) é obtido na figura 10, adaptada de [45].

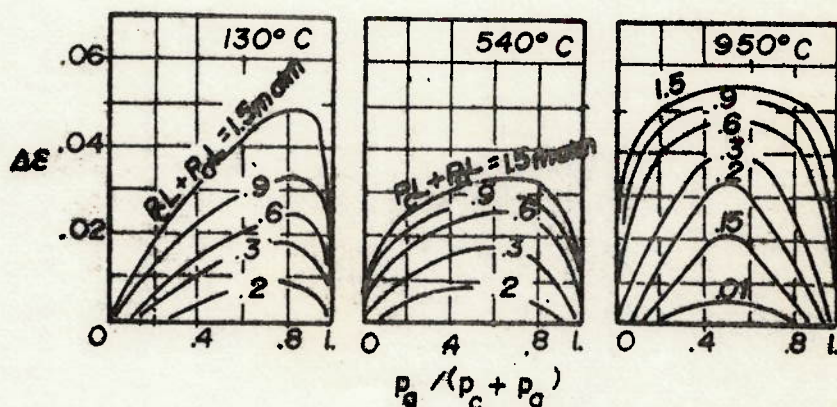


Fig. 10 Correção para a emissividade do gás que contém  $CO_2$  e  $H_2O$  em função de suas pressões parciais.



O fluxo de radiação entre uma superfície negra e um gás que contém dióxido de carbono e vapor d'água é obtido por

$$q = \sigma A (\epsilon_G T_G^4 - \alpha_{G1} T_1^4) \quad (31a)$$

$$\epsilon_G = \epsilon_{c, T_G, P_c L} \cdot C_c + \epsilon_{a, T_G, P_a L} \cdot C_a - \Delta \epsilon T_G \quad (31b)$$

$$\alpha_c = \epsilon_{c, T_1, P_c L} \cdot \frac{T_1}{T_G} \cdot \left( \frac{T_G}{T_1} \right)^{0,65} \cdot C_c \quad (31c)$$

$$\alpha_a = \epsilon_{a, T_1, P_a L} \cdot \frac{T_1}{T_G} \cdot \left( \frac{T_G}{T_1} \right)^{0,45} \cdot C_a \quad (31d)$$

$$\Delta \alpha = \Delta \epsilon T_1 \quad (31e)$$

$$\alpha_{G1} = \alpha_c + \alpha_a - \Delta \alpha \quad (31f)$$

Agora, vamos considerar a questão da absorção de gases reais em fornos.

Considerem-se: a potência emissiva do gás como  $E_g$ ; o fluxo emergente da superfície  $i$  como  $W_i$ ; seja  $\overline{s_i s_j} = A_i F_{ij}$  um fator de forma geométrico relativo às superfícies  $i$  e  $j$ ;  $\overline{gs_i}$  fator de forma geométrico relativo à superfície  $i$  tendo em vista a presença do gás, onde

$$\overline{gs_i} = A_i \epsilon_g \quad (32)$$

Pode-se escrever o fluxo incidente na superfície  $i$  como:

$$A_i H_i = \sum_j \overline{s_i s_j} W_j + \overline{gs_i} E_g \quad (33)$$

que substituído em (19b) fornece:

$$\sum_j (\overline{s_i s_j} - \delta_{ij} \frac{A_j}{\rho_j}) W_j = - \frac{A_i \epsilon_i E_i}{\rho_i} - \overline{gs_i} \cdot E_g \quad (34)$$

A equação (34) difere da equação (23) pela presença do termo  $-\overline{gs_i} E_g$  que provém da equação (33), e que é parcela de energia radiante emitida pelo gás cinzento e que atinge a  $i$ -ésima superfície. Analogamente da equação (24) tem-se

$$\begin{bmatrix} \overline{s_1 s_1} - \frac{A_1}{\rho_1} & \overline{s_1 s_2} & \overline{s_1 s_3} & \dots \\ \overline{s_1 s_2} & \overline{s_2 s_2} - \frac{A_2}{\rho_2} & \overline{s_2 s_3} & \dots \\ \overline{s_1 s_3} & \overline{s_2 s_3} & \overline{s_3 s_3} - \frac{A_3}{\rho_3} & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-A_1 \epsilon_1 E_1}{\rho_1} - \overline{gs_1} E_g \\ \frac{-A_2 \epsilon_2 E_2}{\rho_2} - \overline{gs_2} E_g \\ \frac{-A_3 \epsilon_3 E_3}{\rho_3} - \overline{gs_3} E_g \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (35)$$

Resolvendo-se este sistema obtém-se os demais  $W_i$ . Conhecendo-se as características emissivas das superfícies, e o fluxo térmico radiante, pode-se calcular o fluxo emitido pela superfície e, portanto sua temperatura.

Usualmente, no projeto de fornos, considera-se que a face interna do forno seja superfície radiativamente adiabática (re-radiantes).

Uma zona será considerada radiativamente adiabática, em termos de reflexão difusa, se a sua emissivida-



de for nula, e portanto sua refletância unitária. Esta hipótese simplifica enormemente os problemas de cálculo de radiação, porque agora o fluxo ( $W_r$ ) emergente da superfície re-radiante pode ser calculado pela equação (21c), isto é:  $E_r = E = W_r$ . Resolvendo-se o sistema (24) em termos de  ${}_j W_r$  obtemos  $E_r$  que por sua vez é igual a:

$$E_r = W_r = {}_1 W_r + {}_2 W_r + {}_3 W_r + \dots \quad (36)$$

onde o índice 1,2,3,... subentende paredes não re-radiantes (carga).

Do mesmo modo resolvendo-se o sistema (36) tem-se

$$E_r = W_r = g_r W_r + \sum_i i W_r \quad (37)$$

A equação (37) difere da equação (36) pela presença do termo referente à absorção do gás.

As equações (36) ou (37) permitem o cálculo da temperatura da face interna do forno, pois  $E_r = \sigma T^4 = W_r$ . É baseado nesta temperatura que se pode dimensionar o revestimento dos fornos.

## CAPÍTULO III

COMBUSTÍVEIS

A seguir são dadas algumas definições básicas e é analisado o balanço energético da combustão.

3.1 - DEFINIÇÕES

O processo de combustão envolve a oxidação dos constituintes do combustível que são capazes de serem oxidados e pode, portanto, ser representado por uma equação química. Durante o processo de combustão, a massa de cada elemento permanece a mesma. Assim, escrever as equações químicas e resolver os problemas que envolvem quantidades de vários constituintes é basicamente a aplicação do princípio da conservação da massa de cada elemento |62|.

Deve ser observado que, nos processos de combustão, existem muitos produtos intermediários formados durante a reação química. Neste trabalho, nos interessaremos pelos produtos iniciais e finais e não pelos produtos intermediários, embora este aspecto seja muito importante e deva ser considerado em um estudo detalhado sobre combustão.

Designaremos por combustível o material que pode ser oxidado, e por comburente o material que mantém a combustão. Na maioria dos processos de combustão o comburente é o oxigênio, o qual é fornecido pelo ar.

A composição do ar em base molar é aproximadamente 21% de oxigênio, 78% de nitrogênio e 1% de gases nobres (argônio). Na solução de problemas de combustão, tendo o ar como comburente, não se considera o argônio; e admite-se que o ar é composto de 21% de oxigênio, 79% de nitrogênio, em volume e que o nitrogênio não participa das reações químicas |62|.



Normalmente, o combustível utilizado em fornos é constituído de carbono e hidrogênio, apresentando algumas impurezas; entre as quais é significativa o enxôfre. O combustível se apresenta em várias fases: sólido, líquido ou gasoso.

A combustão é completa quando no produto da reação todo carbono está na forma de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o hidrogênio como água ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

A combustão é dita estequiométrica quando ocorre a queima completa do combustível com a quantidade teoricamente requerida de ar ou de oxigênio. A quantidade de ar além de necessária para a combustão estequiométrica, é chamada de excesso de ar.

Quando a quantidade de ar fornecida é menor do que a quantidade de ar teórico necessário, a combustão é incompleta. Se somente existir uma pequena deficiência de ar, o resultado é que um pouco de carbono une-se ao oxigênio para formar o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) ao invés de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Se a quantidade de ar fornecido for consideravelmente menor do que a quantidade de ar teórico necessária, poderão existir alguns hidrocarbonetos nos produtos de combustão.

Mesmo com excesso de ar podem existir pequenas quantidades de monóxido de carbono nos produtos da combustão. A quantidade adequada de ar depende de diversos fatores, como a homogeneização da mistura e a turbulência que ocorre durante a queima do combustível.

### 3.2 - ESTUDO DA COMBUSTÃO

No estudo da combustão há interêsse em se determinar não só a temperatura adiabática de combustão como também a temperatura real de combustão e, as perdas caloríficas através da fornalha ou dos fumos.

Utiliza-se o balanço de massa e o balanço de energia para se determinar as perdas caloríficas na fornalha e nos fumos.

T °C	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
500	6,99	7,15	7,51	7,20	10,83	8,49	11,18
600	7,02	7,21	7,61	7,28	11,11	8,62	11,42
700	7,04	7,28	7,70	7,35	11,35	8,76	11,62
800	7,07	7,36	7,79	7,44	11,57	8,91	11,79
900	7,10	7,43	7,87	7,51	11,76	9,06	11,95
1000	7,13	7,50	7,94	7,58	11,94	9,20	12,08
1100	7,16	7,57	8,00	7,65	12,11	9,34	12,20
1200	7,21	7,63	8,06	7,71	12,25	9,47	12,29
1300	7,25	7,68	8,13	7,77	12,37	9,60	12,39
1400	7,29	7,74	8,18	7,82	12,50	9,74	12,46
1500	7,33	7,79	8,22	7,85	12,61	9,86	12,53
1600	7,37	7,83	8,25	7,91	12,71	9,98	12,60
1700	7,41	7,87	8,27	7,95	12,80	10,11	12,65
1800	7,46	7,92	8,34	7,99	12,88	10,22	12,70
1900	7,50	7,95	8,39	8,03	12,96	10,32	12,75
2000	7,54	7,99	8,43	8,06	13,03	10,43	12,80

TABELA III a Capacidades Caloríficas Molares Médias de Gases a pressão constante entre 18°C e T °C (Kcal/Kmol °C)

Combustível	PCS	PCI	T °C
C	97000	97000	25
Hidrogênio	68318	57798	25
CaCO	67636	67636	25
CH <sub>4</sub>	212950	191910	18
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	373050	341500	18
Acetileno	311100	300600	18
S	70920	70920	18 - 20

TABELA III b Poder Calorífico Molar de Combustíveis Gasosos a Pressão Constante (Kcal/Kmol)



Para o balanço de energia (aplicação do Primeiro Princípio da Termodinâmica) requer-se o conhecimento: do estado dos reagentes e dos produtos de combustão ( temperatura, pressão, composição e estado de agregação da matéria); e das propriedades térmicas e termodinâmicas dos diversos materiais envolvidos no processo de combustão (poder calorífico, entalpias de formação, capacidade calorífica do combustível e dos constituintes dos fumos, etc.).

Como exemplo dessas propriedades são apresentadas na tabela IIIa capacidades caloríficas molares médias de diversos gases e, na tabela IIIb poder calorífico molar de alguns combustíveis.

A temperatura adiabática de combustão é calculada num processo de combustão estequiométrico que ocorre sem envolver trabalho ou variação de energia cinética ou potencial e sem troca de calor com o meio. Esta é a temperatura máxima que pode ser atingida pelos reagentes porque, qualquer cessão de calor pelas substâncias reagentes ou qualquer combustão incompleta tenderia a diminuir a temperatura dos produtos.

Na prática a temperatura adiabática de combustão não é alcançada pela chama, pois as trocas de calor por convecção e radiação com a carga do forno, e as reações de dissociação não podem ser desprezadas [67].

No apêndice A apresenta-se um exemplo do balanço energético, e no apêndice B um exemplo de cálculo da temperatura adiabática de combustão.

### 3.3 - CARACTERÍSTICAS E ESPECIFICAÇÕES DE ÓLEOS COMBUSTÍVEIS

As especificações dos derivados de petróleo no Brasil são elaborados pelo Conselho Nacional de Petróleo (CNP):

- Querosene                      Norma CNP-03
- Diesel                            Norma CNP-04
- Óleos Combustíveis          Norma CNP-05

Na norma CNP-05 estão classificados os seguintes combustíveis líquidos:

Óleo combustível Tipo A - (BPF: baixo ponto de fluidez)

Óleo combustível Tipo B - (APF: alto ponto de fluidez)

Óleo combustível Tipo D - (BTE: baixo teor de enxofre)

Óleo combustível Tipo C - (OC-4: óleo combustível tipo C)

A principal característica do Tipo A é o baixo ponto de fluidez, o que significa que, em temperaturas normais não é necessário aquecimento para bombeá-lo. Com o tipo B, de alto ponto de fluidez, dá-se o contrário.

O tipo D, baixo teor de enxofre, tem como característica principal a limitação em 1% da quantidade de enxofre, não sendo especificado o ponto de fluidez.

O tipo C provém do refino do petróleo, isto é, não é um óleo residual (como são os tipos A, B e D), mas é misturado com parte do tipo A até tornar-se escuro, evitando assim que seja confundido com o Diesel, pois as viscosidades e coloração destes dois produtos são próximas.

Muitas vezes, por razões técnicas, é conveniente utilizar combustível que não se enquadra em um tipo padrão. Assim é comum empregar-se combustível resultante da mistura de Diesel ou do tipo C com o tipo A.

Por razões econômicas procura-se utilizar sempre que possível o combustível mais barato. A mistura é sempre mais cara que o tipo A e mais barata que o Diesel ou o tipo C.

A tabela IV apresenta algumas características de óleos combustíveis.



Análises Típicas	Querosene	Diesel	OC-4	BPF	BTE	APF
Densidade 20° g/cm <sup>3</sup>	0,785	0,825	0,865	0,970	0,910	0,925
Pto Fulgor °C	55	74	85	130	160	140
Viscosidade Cin. 20° cst	2,2					
Viscosidade SSU 100F		39	45	10000	5600	5000
Pto Fluidoz			2	10	48	35
Enxôfre % peso	0,03	0,70	1,4	4,6	0,15	2,8
PCS kcal/kg	11100	10950	10840	10350	10650	10525
PCI kcal/kg	10380	10260	10180	9770	9950	9810

TABELA IV - Características dos óleos combustíveis

3.4 - ANÁLISES DOS COMBUSTÍVEIS E DOS PRODUTOS DA COMBUSTÃO

A quantidade teórica de ar necessária à combustão é calculada [14] a partir da equação química da combustão e pode ser estimada com boa aproximação pela fórmula:

$$\text{Kg ar/Kg combustível} = 11,5C + 34,7H_2 + 4,3S \quad (38)$$

onde C, H<sub>2</sub> e S representam respectivamente, os percentuais de carbono, hidrogênio e enxôfre no combustível.

A porcentagem em peso de hidrogênio e carbono são obtidas [14] por:

$$\%H_2 = 26 - 15000 \cdot (\text{massa específica do combustível em kg/m}^3) \quad (39)$$

$$\%C = 100 - (\%H_2 + \%S + \%H_2O + \text{cinza}) \quad (40)$$

O teor de enxôfre, da água e das cinzas podem ser obtidos em análises de laboratório.

A análise dos combustíveis e dos produtos da combustão fornece os dados para os balanços de massa e de energia|20|; tais análises podem ser de três tipos:

- elementar, na qual se determinam os teores de carbono, nitrogênio, enxôfre e demais elementos que se encontram no combustível.

- imediata, na qual se determinam a umidade, a matéria volátil, a cinza e o carbono que ainda fica no combustível após a eliminação da matéria volátil (carbono fixo).

- dos produtos da combustão, na qual se determina a composição volumétrica dos gases na combustão.

A análise dos produtos da combustão permite que se corrija a quantidade de comburente para se ter a combustão completa.

Maiores detalhes sobre o procedimento nas análises estão nas referências|17| ,|20| ,|28| ,|52| ,|58| ,|59| e |67|. .



## CAPITULO IV

REFRATÁRIOS E ISOLANTES

Definem-se refratários, refratários isolantes e isolantes, bem como suas características e aplicações.

4.1 - INTRODUÇÃO

Os elementos empregados no revestimento de fornos são materiais não metálicos destinados à construção de fornos por resistirem a altas temperaturas (e eventual isolação térmica) |47|.

Os elementos de revestimento empregados em fornos devem resistir ao:

- choque térmico provenientes do rápido aquecimento ou resfriamento do forno;
- desgaste mecânico proveniente do movimento da carga;
- ataque químico provocado pelos corpos em aquecimento, pelos líquidos e pelos gases;
- temperatura de trabalho do forno.

Os elementos empregados no revestimento de fornos são classificados em três grupos: refratários, refratários isolantes e isolantes, os quais serão analisados nas próximas seções.

O refratário é usado como material em contato com a atmosfera interna do forno.

O refratário isolante é o material que algumas vezes é utilizado entre o refratário e o isolante (fig. 11), e que produz um gradiente térmico maior que o produzido pelo refratário.

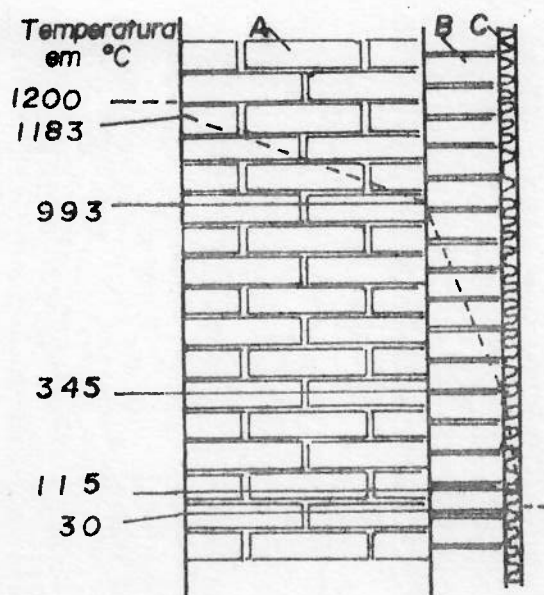


Fig.II Gradiente de Temperatura em Paredes de Fornos

onde A refratário  
B refratário isolante  
C isolante

O isolante é o elemento que tem sua face quente em contato com o refratário isolante ou com o refratário, e sua face fria em contato com o material de revestimento externo do forno ou com o ambiente.

#### 4.2 - REFRATÁRIOS

Os refratários comerciais são classificados num dos seguintes grupos:

- sílico-aluminosos
- aluminosos
- silicosos
- básicos



Em alguns destes grupos há diversas classes como será visto adiante.

Outros tipos de refratários, de uso restrito, são os constituídos por:

- grafite
- carbono
- zircônio
- cromo (denominado cromítico)
- carbetto de silício.

#### 4.2.1 - Características dos Refratários

O refratário sílico-aluminoso é apresentado em três classes: uma constituída pelo superduro; outra constituída pelos: muito duro, de dureza média e o de baixa dureza; e a terceira, com os semi-silicosos.

As propriedades do superduro são: alta refratariedade, estabilidade volumétrica a altas temperaturas, baixa porosidade, baixa expansão térmica, baixa resistência à escória ácida e moderada à escória básica, excelente resistência ao desgaste térmico.

Os muito duros, de dureza média e o de baixa dureza apresentam propriedades físicas e químicas que variam de acordo com sua composição química. As propriedades do refratário sílico aluminoso muito duro se aproximam às do superduro, enquanto que as propriedades dos de baixa dureza são: pequena refratariedade comparativamente aos do superduro, maior porosidade, baixa expansão térmica e razoável resistência ao desgaste térmico.

Os semi-silicosos têm boa rigidez e estabilidade volumétrica a altas temperaturas, boa resistência ao desgaste térmico, alta resistência à penetração e ao ataque de álcalis voláteis.

Os aluminosos apresentam: boa resistência me-

cânica nas altas temperaturas; resistência adequada aos ataques de escórias básicas, dos fumos e dos óleos combustíveis; baixa resistência a escórias ácidas; refratariedade, que aumenta com a porcentagem de alumina.

Os silicosos possuem boa resistência mecânica a altas temperaturas, baixa expansão térmica, boa resistência ao ataque de escória ácida e ao ataque do óxido de ferro em atmosfera oxidante; é facilmente atacado por escória básica e, resiste a fumos que contêm óxido de calcáreo.

Os refratários básicos são apresentados nas classes magnésio e cromo-magnésio.

O da classe magnésio apresenta alta refratariedade, alta condutibilidade térmica, alta expansão térmica, boa resistência ao ataque de escória básica, baixa resistência ao ataque de escória silicosa.

O da classe cromo-magnésio tem alta expansão térmica, boa resistência mecânica, estabilidade volumétrica a altas temperaturas e alta resistência à escória básica.

O refratário básico resiste menos ao choque térmico do que os sílico-aluminosos e aluminosos.

Os refratários de zircônio têm alta refratariedade, alta condutibilidade térmica, boa resistência ao ataque de fluxos alcalinos, baixa expansão térmica, densidade elevada, baixa porosidade, boa resistência à umidade e ao ataque vítreo ou ao carbetto de silício.

Os refratários de carbetto de silício têm baixa expansão térmica; elevada dureza; boa resistência à abrasão e elevada resistência a fluxos corrosivos, como os que ocorrem em fornos queimadores de enxôfre, em fornos cerâmicos ou de refino de zinco, e nos fornos reverberadores de não ferrosos.

Finalmente, define-se como refratário monolítico os materiais empregados no revestimento de juntas de expansão ou na fabricação de tijolos com formatos especiais, que são moldados nos locais de sua aplicação.



Os refratários monolíticos são constituídos de misturas de materiais que integram os refratários simples. Podem ser aplicados pneumaticamente ou manualmente em qualquer tipo de contorno. São utilizados em instalações que queimam o óleo combustível, em fornos de aquecimento, fornos de forja, in cineradores e em caldeiras.

#### 4.2.2 - Seleção e uso de refratários

A seleção do refratário é determinada pelos seguintes fatores:

##### a) Fatores ligados à operação

- Função do forno
- Natureza do material a ser processado
- Modo de operação
- Calor induzido por unidade de volume
- Taxa de dissipação térmica
- Temperatura em diferentes partes do forno
- Fonte térmica, se é do tipo a combustão, ou se é elétrico a arco, ou a resistência ou de indução
- Ataque químico por óxidos de metais, escórias e outros materiais corrosivos
- Ataque químico por fumos ou gases
- Velocidade dos gases em contato com as interfaces
- Abrasão proveniente do movimento das cargas
- Impacto proveniente do carregamento do forno.

b) Fatores relacionados com o projeto e construção

- Tipo de forno
- Dimensões das paredes e arcos
- Carregamento imposto às interfaces
- Condições de aquecimento
- Tipo estrutural
- Resfriamento por ar ou água
- Espessura das juntas
- Previsão para expansão térmica

c) Fatores ligados a refratários

- Refratariedade
- Temperatura de vitrificação
- Resistência ao choque térmico
- Resistência ao ataque químico
- Resistência mecânica
- Permeabilidade a gases e líquidos
- Estabilidade volumétrica
- Porosidade
- Custo de transporte
- Custo de instalação
- Comparação do custo dos tamanhos padronizados x formatos especiais
- Vida em serviço
- Custo de manutenção

Em vista do grande número de fatores fica visível a dificuldade que se encontra para proceder à escolha do refratário. A seleção é facilitada por informações de fornos que operam em condições similares, ou pela consideração de partes destes fatores como: temperatura do forno, temperatura do ambiente de trabalho, da susceptibilidade a ataque por escórias e dos efeitos mecânicos.

Como orientação segue-se o emprego abaixo:

Os refratários sílico-aluminosos de alta du-



reza são empregados em câmaras de combustão de alto forno e em fornos calcinadores.

Os refratários sílico-aluminosos muito duros são empregados em fornalhas que operam a temperaturas moderadas ( $<850^{\circ}\text{C}$ ).

Em fornos com temperaturas de até  $2000^{\circ}\text{C}$  são empregados os refratários aluminosos com alto teor de alumina, desde que não existam agentes corrosivos ou fatores físicos destrutivos. Seu emprego é recomendado quando nos produtos da combustão encontramos óxido de vanádio. A escolha entre o refratário sílico-aluminoso e o de alta alumina dependerá principalmente do combustível, temperatura e do ataque térmico. Assim, o refratário de alta alumina será empregado se ocorrer choque térmico, ou se as temperaturas são elevadas ( $2000^{\circ}\text{C}$ ) pois, sua resistência a estes efeitos é superior aos dos refratários sílico-aluminosos.

Em fornos de fusão de vidro ou de cobre, utiliza-se o refratário de sílica super-duro. O refratário de sílica convencional é usado em fornos elétricos de fusão, em paredes de fornos de refinaria, ou quando os produtos de combustão forem alcalinos.

Em fornos que operam em altas temperaturas e ambiente básico, como nos fornos de fusão ou de refino de cobre, utiliza-se o refratário básico, tanto por seu caráter químico (básico) como pela sua elevada temperatura de fusão.

É vedada a união de tijolos sílico-aluminosos aos de magnésio em temperaturas superiores a  $1300^{\circ}\text{C}$ , tendo em vista a reação violenta que ocorre entre a sílica e o magnésio a tal temperatura. É conveniente separá-los por um meio neutro como o refratário cromítico.

Os refratários de magnésio ou de cromo são empregados em fornalhas quando a ação corrosiva da escória for severa.

Nos fornos mufla, retortas e construções similares é necessária uma elevada taxa de transmissão térmica.

Neste caso empregam-se ou os refratários de carvão de sílica ou de zircônio.

O refratário de zircônio é empregado em fornos de silicato de sódio, em fornos de fusão de não ferrosos e em fundo de tanques cerâmicos.

#### 4.3 - REFRATÁRIOS ISOLANTES

O constituinte básico dos refratários isolantes é a argila refratária.

Os tijolos isolantes são mais leves que o refratário simples, em vista de sua elevada porosidade.

Devido ao tamanho, número e disposição dos poros existentes na constituição dos refratários isolantes, estes apresentarão variação das propriedades físicas e químicas maiores que a do refratário simples, quando a temperatura variar.

Os tijolos refratários isolantes são feitos de diatomita, vermiculita expandida, caolim, minerais de alta alumina, quartzita e outros materiais afins.

A ASTM classifica os refratários isolantes segundo os grupos 16, 20, 23, 26 e 28. Estes números multiplicados por 100 representam a máxima temperatura (Fahrenheit) a que este material pode ser submetido.

As vantagens do emprego do refratário isolante sobre o refratário simples são:

- economia de combustível devido a perdas térmicas menores;
- baixa capacidade calorífica;
- aumento de produção devido ao pequeno intervalo requerido para o aquecimento;
- maior facilidade no controle operacional do forno, decorrente da menor inércia térmica, o que permite respostas mais rápidas na variação da temperatura;



- decréscimo no tamanho e no peso do forno por ser uma isolação mais leve.

Não se pode pensar em utilizar apenas refratário isolante devido a diversos fatores, entre os quais:

- o seu uso é limitado por temperaturas bem menores que as do refratário simples;
- ele é prejudicado pelos gases de combustão por ser mais poroso;
- é atacado pela escória em suspensão existente no fluido empregado como veículo de troca calorífica entre a câmara de combustão e a carga do forno.

O refratário isolante é normalmente empregado em alto forno, fornos elétricos, fornos de forja, fornos de aquecimento, fornos metalúrgicos e fornos de normalização.

A aplicação destes materiais é recomendada para temperaturas cerca de 100°C abaixo de sua temperatura máxima de especificação. Com este cuidado evita-se diminuir suas propriedades isolantes.

#### 4.4 - ISOLANTES

Isolantes são materiais que possuem baixa condutibilidade térmica.

Como os isolantes apresentam um grande número de pequenos interstícios de ar, sua resistência mecânica é baixa.

Quando usados como revestimento de interiores de fornos eles se deformam, se fundem ou sofrem outros efeitos danosos como o ataque das escórias e dos gases da combustão.

Os constituintes básicos dos isolantes são:

materiais fibrosos (como amianto), lã mineral, terra diatomácea; e são encontrados na forma de mantas, flocos, painéis rígidos e cordões.

Os isolantes comercializados são classificados num dos grupos que se seguem:

- asbestos livre
- fibras de alumina com fibras de rayon
- alumina pura com incrustações de sílica
- lã de vidro
- lã de rocha
- terra diatomácea
- caulim
- feltro asfáltico.

Os isolantes de asbestos livre podem ser flexíveis ou rígidos, dependendo do processo de fabricação. São empregados em sistemas de aquecimento de água, em refinarias de óleo, alto-fornos, caldeiras, e como elemento de revestimento externo na maioria dos fornos.

Os isolantes de fibras de alumina e fibras de rayon são aplicáveis em temperatura bem acima às do asbestos livre. São imunes ao choque térmico, resistentes ao ataque químico e, são empregados na isolação térmica de fornos em associação a refratários simples.

O isolante de alumina pura com incrustações de sílica têm baixa capacidade calorífica; baixa condutibilidade térmica e é extremamente resistente ao choque térmico. Deve ser empregado se a atmosfera for redutora. Esse isolante não contamina a atmosfera do forno, mesmo na presença da chama de combustão, já que é isento de matérias orgânicas; eliminada eventual contaminação por umidade, o isolante readquire suas propriedades físicas.

O isolante de fibra de vidro é usado no revestimento de caldeiras, estufas, autoclaves e fornos. A principal limitação à sua utilização é a temperatura de operação máxima.



ma que se situa em torno de 600°C.

O isolante de lã de rocha tem as mesmas aplicações das de fibra de vidro, porém não devem ser aplicados em ambientes onde existam pequenas concentrações de ácido fosfórico, fluorídrico ou álcalis concentrado.

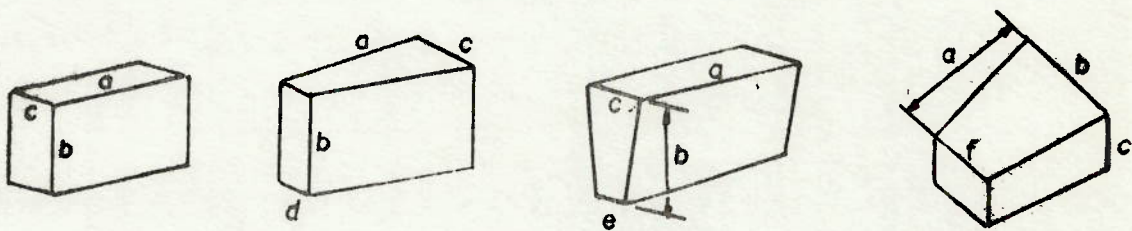
A vermiculita é constituída por silicatos hidratados de alumínio e magnésio. Não deve ser aplicada em ambientes onde existam pequenas concentrações de ácido fluorídrico. A temperatura máxima de operação da vermiculita é próxima aos 1000°C.

O caolim e o feltro asfáltico apresentam condutibilidade térmica menor, por isso são empregados quando o gradiente térmico pretendido não é muito grande. A mão de obra para sua aplicação é mais barata que para os outros tipos de isolantes.

#### 4.5 - DISPONIBILIDADE NO MERCADO

A título de ilustração apresentam-se, a seguir, algumas informações de produtos existentes no mercado.

A tabela V apresenta algumas dimensões e tipos padronizados dos refratários fabricados no Brasil.



Grupo	a	b	c	d			e			f		
I	229	114	32									
II	229	114	38									
III	229	114	63	57	48	38	54	44	25	102	89	76
IV	229	114	76	70	63	51	70	63	51	102	89	76
V	229	152	63	70	63	51						
VI	229	152	76	70	63	51	70	63	51	137	122	76
VII	229	172	63									
VIII	229	172	76	70	63	51						
IX	229	229	63									
X	229	229	76									
XI	305	114	76									
XII	305	152	63									
XIII	305	152	76	73	70	63	70	63	51	140	127	76
XIV	305	229	76	73	70	63						
XV	343	114	76				70	63	51			
XVI	343	152	76	73	70	63	70	63	51	127	111	
XVII	343	229	76	73	70	63	70	63	51			

medidas em mm.

TABELA V Formatos e Dimensões Padronizados de Alguns Refratários



A tabela VIa apresenta algumas características destes refratários.

Código	Tipo	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	MgO %	CaO %	Por. op. %	Peso Esp. g/cm <sup>3</sup>	Res. Co mpr. Kg/cm <sup>2</sup>	Refrant Carga °C	Temp Máx. °C
1	Si Al	39,50	1,95				23,0	2,00	200	1430	
2	Al	49,50	2,20				22,0	2,15	280	1500	
3	Al	59,60	2,30				22,0	2,20	280	1500	
4	Al	69,26	2,60				20,5	2,40	300	1550	
5	Al	80,50	1,80				22,0	2,60	400	1650	
6	Al	91,80	0,80				20,0	2,95	850	1800	
7	Si	0,70	0,30	99,70			19,30	1,82	400	1680	
8	Is	38,80						0,65	6,00		1100
9	Is	42,80						0,83	15,00		1250
10	Is	42,40						1,05	25,00		1450
11	Is	43,40						1,25	52,00		1450
12	Is	62,50						1,05	25,00		1500
13	Ba		2,50	3,20	92,40	1,26	22,0	2,70	700	1600	

TABELA VIa Características Físicas de alguns Refratários e Refratários Isolantes fabricados no Brasil

Nota: Si Al refr. Silico-Aluminoso      Al refr. Aluminoso  
Si refr. Silicoso                      Ba refr. Básico  
Is refr. Isolante

A tabela VIb apresenta características físicas de alguns isolantes fabricados no Brasil.

Código	Classif. ASTM	Peso Esp. Kg/m <sup>3</sup>	Temp.Lim. uso °C	Tens.Lim. Comp. Kg/cm <sup>2</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Pto. Fus. °C	Cal. Esp.. médio Kcal/Kg°C
Is. 1	C26264	48	650	137					
Is. 2	C61270 Classe 5	240	1000	13660					
Is. 3	C61270 Classe 3	64	500	542					
Is. 4			1650		95	5		2000	0,25
Is. 5			1400		55	44,9		1800	0,55
Is. 6		40	1250	11,5	45	51,9	1,3	1750	0,26

TABELA Vlb. Propriedades Físicas de alguns Isolantes.  
Fabricados no Brasil

Informações adicionais sobre dimensões, propriedades físicas, composição química e aplicações estão nas referências |8|, |9|, |15|, |29|, |41|, |47|, |54|, |55|, |64| e |65|.



## CAPITULO V

FORNOS

Apresentam-se informações sobre fornos e alguns esquemas de revestimento.

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE FORNOS

Forno ou fornalha é um dispositivo empregado para aumentar a temperatura de certos materiais (denominados carga) colocados em seu interior. Geralmente o calor requerido é obtido ou às custas da queima de um combustível, ou pelo uso de energia elétrica.

O termo forno se refere, usualmente, a dispositivos de aquecimento que operam acima de 300°C. Até essa temperatura, grande número de processos industriais empregam vapor como veículo de aquecimento, sendo denominados de estufas.

Esquemáticamente, pode-se dizer que um forno é composto por:

- uma estrutura de sustentação mecânica (vigas e chapas de aço);
- uma estrutura para suportar os efeitos térmicos (refratários e isolantes);
- geradores de energia térmica (queimadores ou resistências);
- dispositivos de controle térmico.

O termo forno industrial é empregado para dispositivos que atingem temperaturas nas quais ocorrem reações químicas ou mudanças de estado de agregação da matéria.

Quando não ocorre nem reação química nem mudança de estado de agregação da matéria, o forno é denominado forno de aquecimento; um exemplo típico do emprego do forno de aquecimento é no tratamento térmico de metais, cujo objetivo é a

alteração das propriedades físicas do material tratado.

## 5.2 - UMA CLASSIFICAÇÃO DOS FORNOS

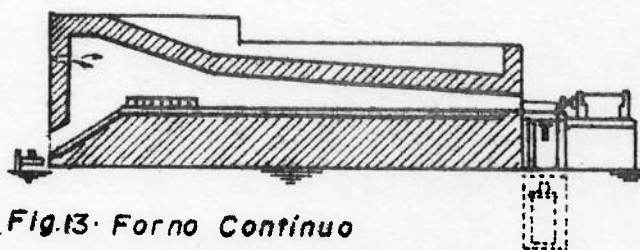
Um critério de classificação dos fornos se ba seia na manipulação da carga. Segundo este critério tem-se dois tipos:

- fornos intermitentes ou periódicos (as cargas são supri- das por lotes) figura 12.

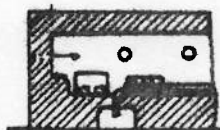


*Fig.12 Forno de Carregamento por Lote*

- fornos contínuos (as cargas são supridas de forma contí- nua) figuras 13 a 17.



*Fig.13 Forno Contínuo*



*Fig.14 Corte de Forno Contínuo de Descar- regamento Lateral*



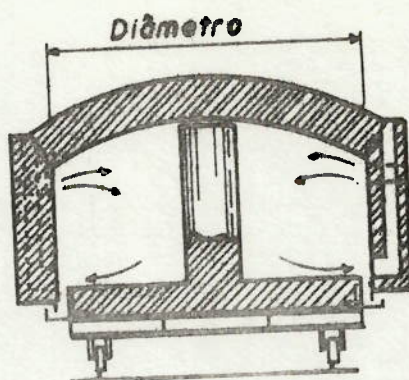


Fig.15. Forno Contínuo com Soleira Giratória

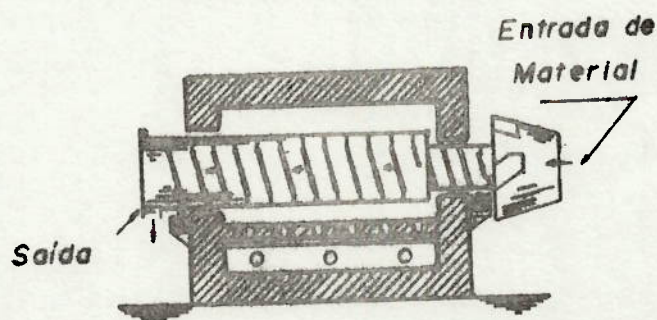


Fig.16. Forno Contínuo com Transportador Helicoidal

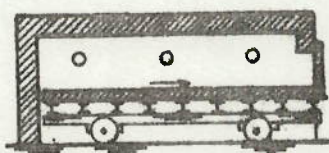


Fig.17. Forno de Soleira Móvel

Outra classificação é a fonte de energia: elétricos ou a combustão.

Uma sub-classificação para fornos de combustão é a que se baseia no local onde se realiza a combustão, sendo que a forma de dirigir os produtos da combustão serve de base adicional para nova sub-divisão:

- se a chama se desenvolve na própria câmara de aquecimento (figuras 12 e 15), o forno é chamado de aquecimento direto (ou tipo estufa);

- se a chama se produz abaixo da soleira e logo passa para a câmara de aquecimento, o forno é dito de aquecimento na parte inferior;

- se a chama se produz acima da câmara de aquecimento e flui para baixo, o forno é de aquecimento pela parte superior - figuras 18, 19 e 20.

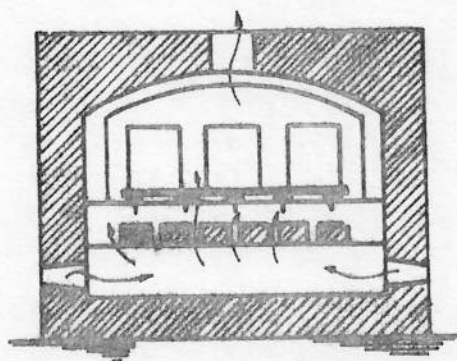


Fig.18 Forno de Aquecimento Inferior

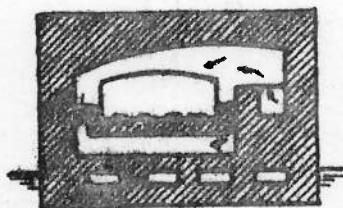


Fig.19 Forno de Aquecimento Lateral

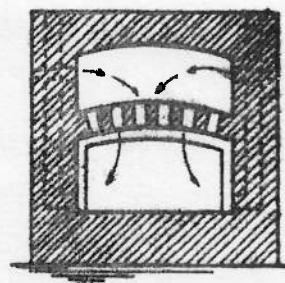


Fig.20 Forno de Aquecimento Superior

Em temperaturas de operação da ordem de 650°C-850°C é usual se classificar os fornos em fornos de recirculação ou circulação forçada (figura 21). O uso destes meios visa se obter melhor homogeneização de temperaturas.



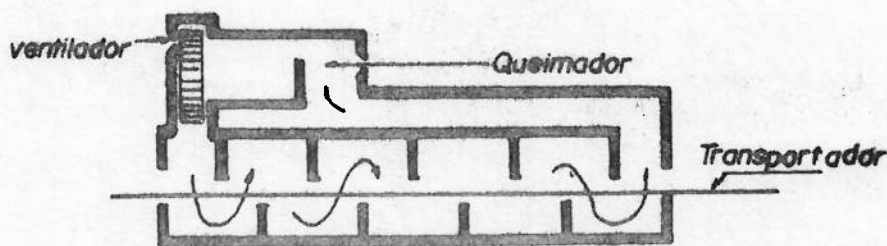


Fig.21. Forno de Recirculação

Outras denominações são as seguintes:

- em certos processos o contato dos produtos da combustão pode ser prejudicial; nesses casos, a carga é confinada a um compartimento estanque e o forno é chamado de forno mufla.

- o aproveitamento de parte da energia dos gases da combustão pode ser feita pré-aquecendo-se ou as peças frias ou o ar de combustão; são os fornos de pré-aquecimento.

O pré-aquecimento do ar de combustão pode ser efetuado de duas maneiras:

a) parte da energia disponível na exaustão dos gases da combustão é cedida ao ar que entra através de uma parede (forno de recuperação) - figura 22.

b) Os produtos de combustão transferem calor aos refratários e à carga numa câmara apropriada; o ar de combustão absorve calor dos refratários de outra câmara que foi previamente aquecida pelos gases de combustão. Inverte-se a direção do fluxo dos fumos a intervalos regulares (forno regenerador ou Siemens) - figura 23.

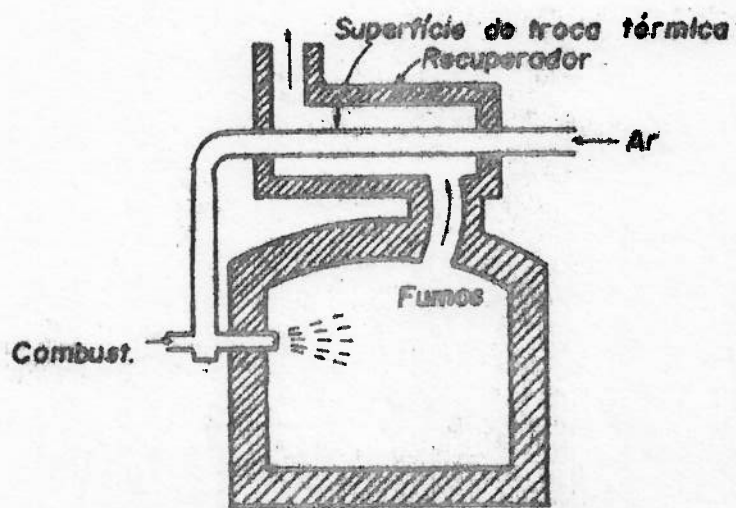


Fig.22 Forno de Recuperação

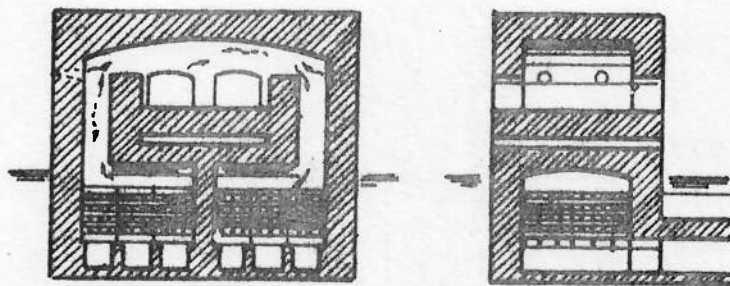


Fig.23 Forno de Regeneração

Tanto os fornos de recuperação como os de regeneração são empregados nos fornos calcinadores, usados no recozimento de metais - figura 24. A carga é aquecida gradualmente pelos produtos da combustão; os produtos após passarem pela zona de temperatura mais alta (câmara de termodifusão), transferem calor ao ar de combustão, pré-aquecendo-o.



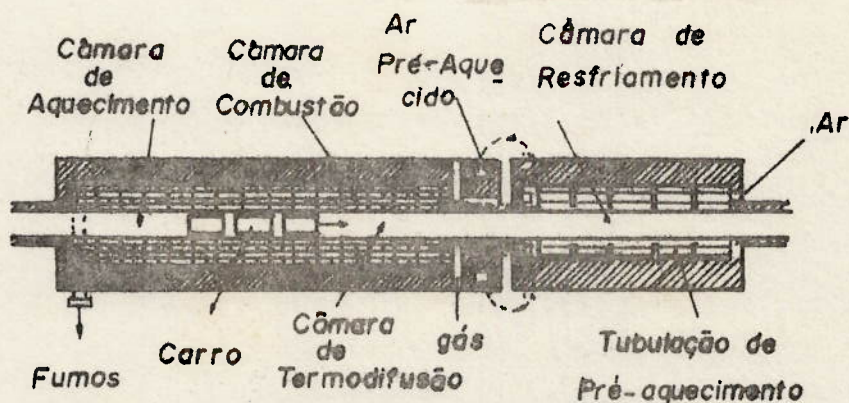


Fig.24. Forno Túnel

Em fornos elétricos pode-se realizar o aquecimento pela transformação de energia elétrica em energia térmica. Esse aquecimento pode ser realizado por correntes primárias (via resistências) ou por correntes induzidas (via peça a ser aquecida) - figuras 25 e 26.

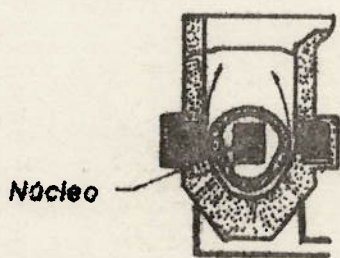


Fig.25 Forno de Fusão por Indução com Núcleo

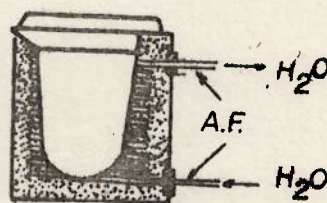


Fig.26 -Forno de Fusão sem Núcleo

Basicamente existem cinco tipos de fornos elétricos:

- trifásico de arco direto: usado na fusão e refino do aço, do ferro, do cobre e do níquel;

- monofásico de arco indireto (de tamanho relativamente pequeno): usado na fusão de aço, de ferro, de cobre e ligas de cobre ;

- monofásico ou trifásico de arco submerso: usado na produção de ligas de ferro, ligas de níquel, abrasivos, ligas de titânio;

- resistência: usado na grafitização do carbono, no tratamento térmico de vários metais e na fusão de ligas

- indução ( a alta e baixa frequência): usado na fusão de metais e ligas férricas e não férricas.

### 5.3 - INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES SOBRE FORNOS

Para encerrar este capítulo apresentaremos algumas considerações sobre revestimento de fornos e juntas de expansão, bem como alguns esquemas de revestimento.

#### 5.3.1 - Fundações e juntas de expansão

A fundação dos fornos industriais é normalmente feita de concreto refratário. Esse concreto é constituído pela mistura de areias, cimento refratário e um agregado.

É usual o emprego de um agregado formado por quartzo em pedra, cascalho de sílica ou pedras de sílica triturada.

O emprego de cascalho de sílica é limitado pela temperatura do forno; em temperaturas superiores a 550°C, a sua dilatação térmica é elevada, o que provoca fissuras do material.

Já o concreto refratário de alta resistência térmica suporta temperaturas de até 1300°C, desde que não se adi-



cione agregantes. A adição de agregantes dificulta a livre expansão (durante o aquecimento) ou contração (durante o resfriamento) do concreto refratário a altas temperaturas.

Ao se projetar um forno deve-se considerar a expansão térmica do revestimento. Da previsão inadequada podem decorrer a fissura dos refratários ou perdas térmicas exageradas.

A figura 27 esquematiza algumas construções usuais de juntas de expansão térmica.

A argamassa é usada para unir os tijolos refratários ou refratários isolantes.

O constituinte básico da argamassa é a sílica-alumina.

A junção dos tijolos pela argamassa protege as faces que foram unidas, do ataque das escórias, ao mesmo tempo que impede infiltrações de ar frio.

### 5.3.2 - Alguns esquemas construtivos

A seguir são apresentadas informações adicionais sobre fornos de aquecimento, de tratamento térmico, e elétricos.

#### a) Fornos de aquecimento

- faixa de temperaturas: de 1000°C até 1700°C;
- escolha dos refratários depende da: temperatura, grau de abrasão, operação, escórias e fumos;
- refratários normalmente empregados:
  1. fornalhas: sílico-aluminosos muito duro ou super-duro, ou eventualmente, refratário de magnésio;
  2. zonas de pré-aquecimento ou resfriamento: sílico-aluminosos;

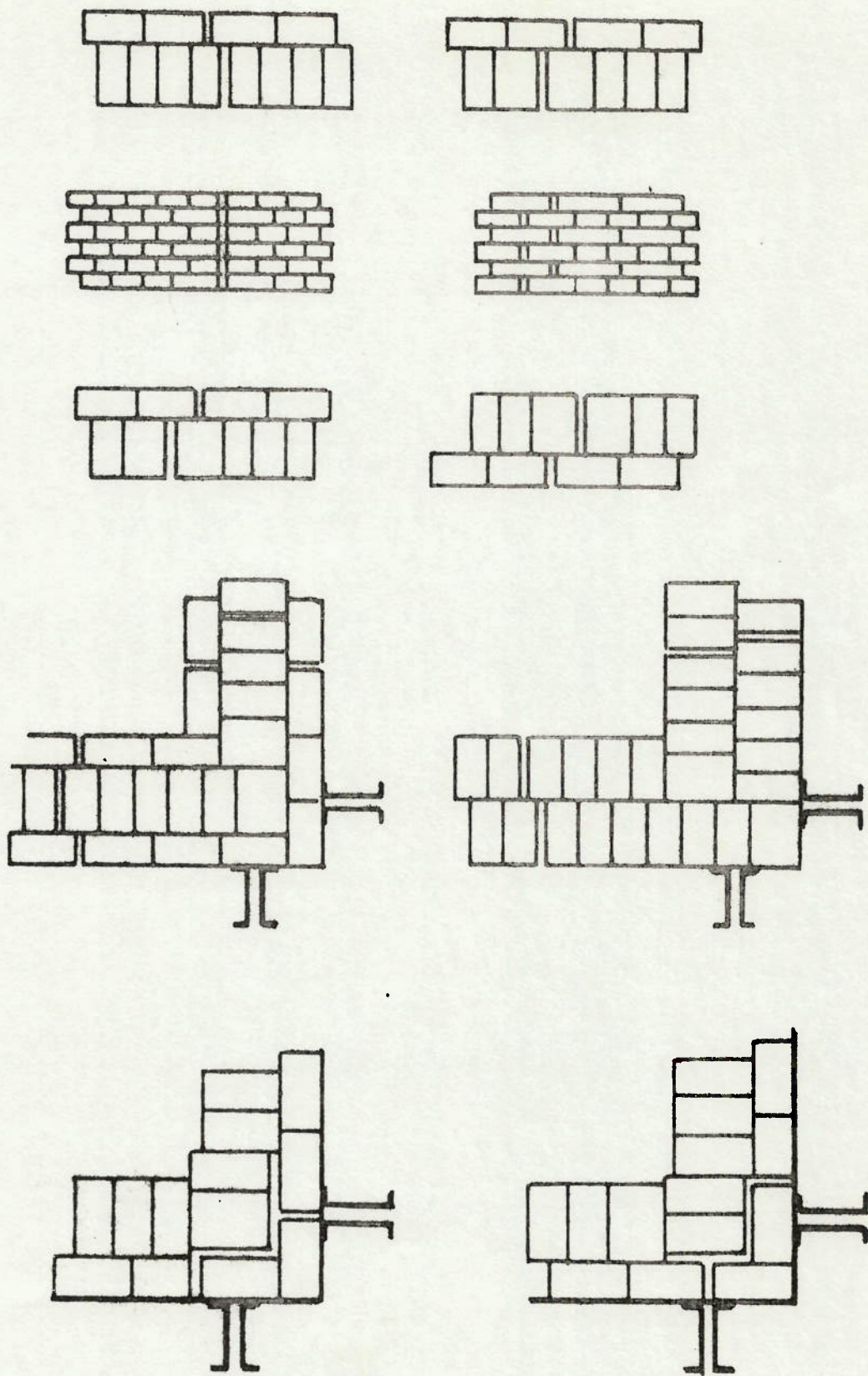


Fig.27. Construções Típicas de Juntas de Expansão em Fornos

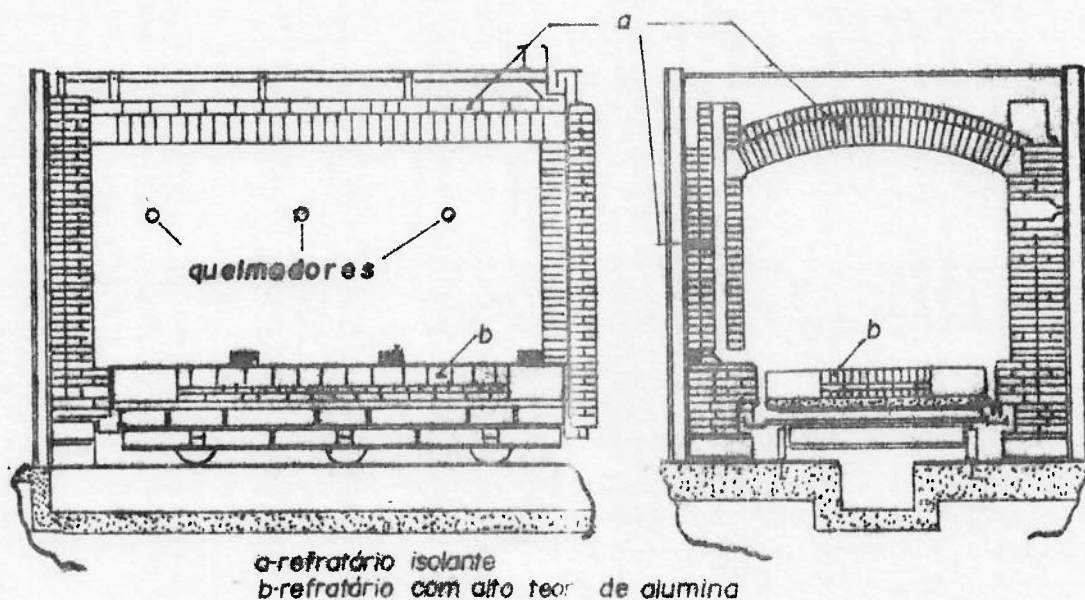


3. paredes laterais: refratários de sílica ou de alumina.

b) Fornos de tratamento térmico

- faixa de temperaturas: de 400°C até 1200°C ;
- escolha dos refratários depende: da atmosfera no interior do forno; do choque térmico; se é a combustão ou elétrico;
- refratários normalmente empregados:
  1. paredes laterais: sílico-aluminoso duro ou super-duro;
  2. fornalhas: sílico-aluminoso ou de alto teor em alumina;
  3. teto: refratários isolantes sílico-aluminosos ou refratários sílico-aluminosos.

A figura 28 ilustra o revestimento de um forno de tratamento térmico.



**Fig 28. Forno Vagoneta para Tratamento Térmico**

c) Fornos elétricos

Muitos metais e suas ligas, minérios e minerais são processados em fornos elétricos. Por processo de metais entende-se a fundição e o refino destes materiais:

Os principais produtos processados em fornos elétricos são o aço e o ferro. Outros materiais processados em menor escala são: níquel, cobre, alumínio, zinco, abrasivos, elementos fosforosos, fundição de refratários e grafitização do carbono.

A seguir comenta-se o revestimento de fornos elétricos de arco direto, de arco indireto, de resistência e de indução. Para maiores detalhes sugere-se a referência |65|.

c1) Trifásico de arco direto

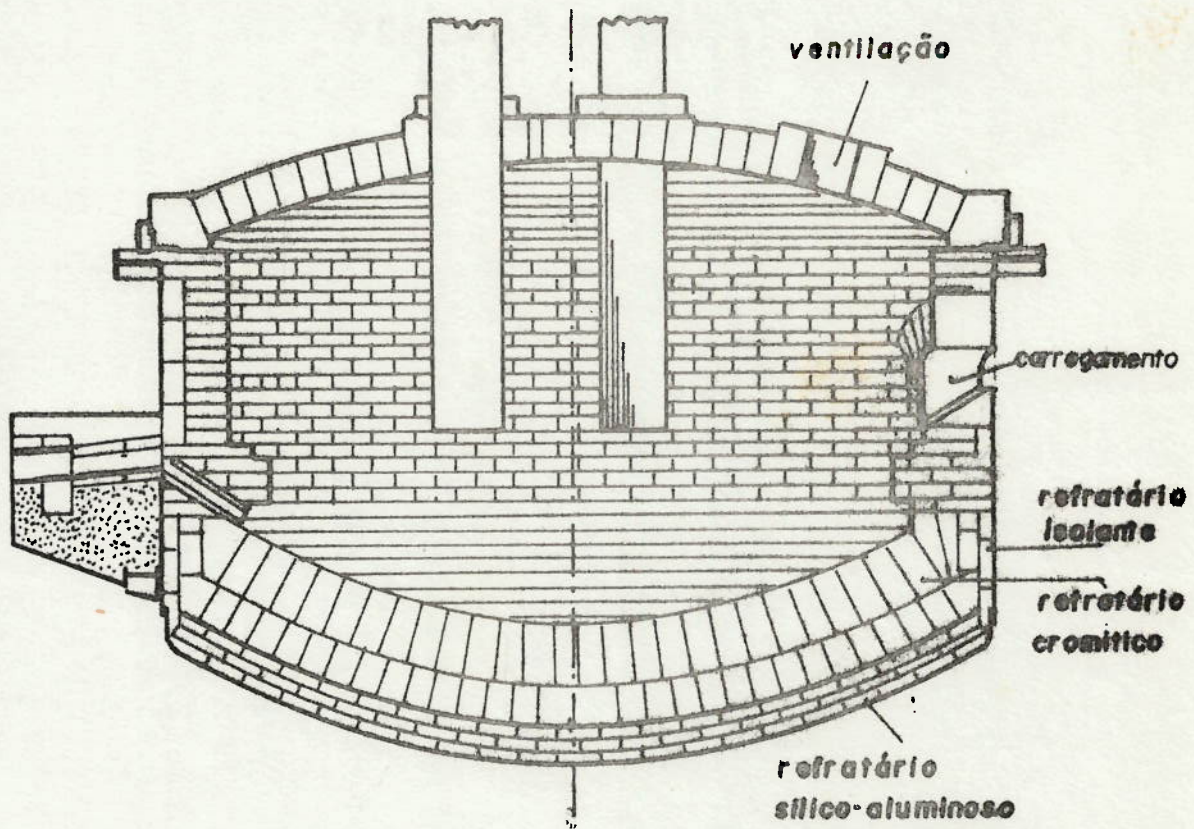
- faixa de temperaturas: 1500º - 1760ºC;
- escolha dos refratários é função do tipo de operação (intermitente ou contínuo);
- refratários normalmente empregados:
  1. teto: silicosos ou sílico-aluminosos;
  2. paredes laterais: silicosos, ou básicos, ou aluminosos com alta alumina;
  3. portas: alta alumina ou refratário de magnésio.

c2) Monofásico de arco indireto

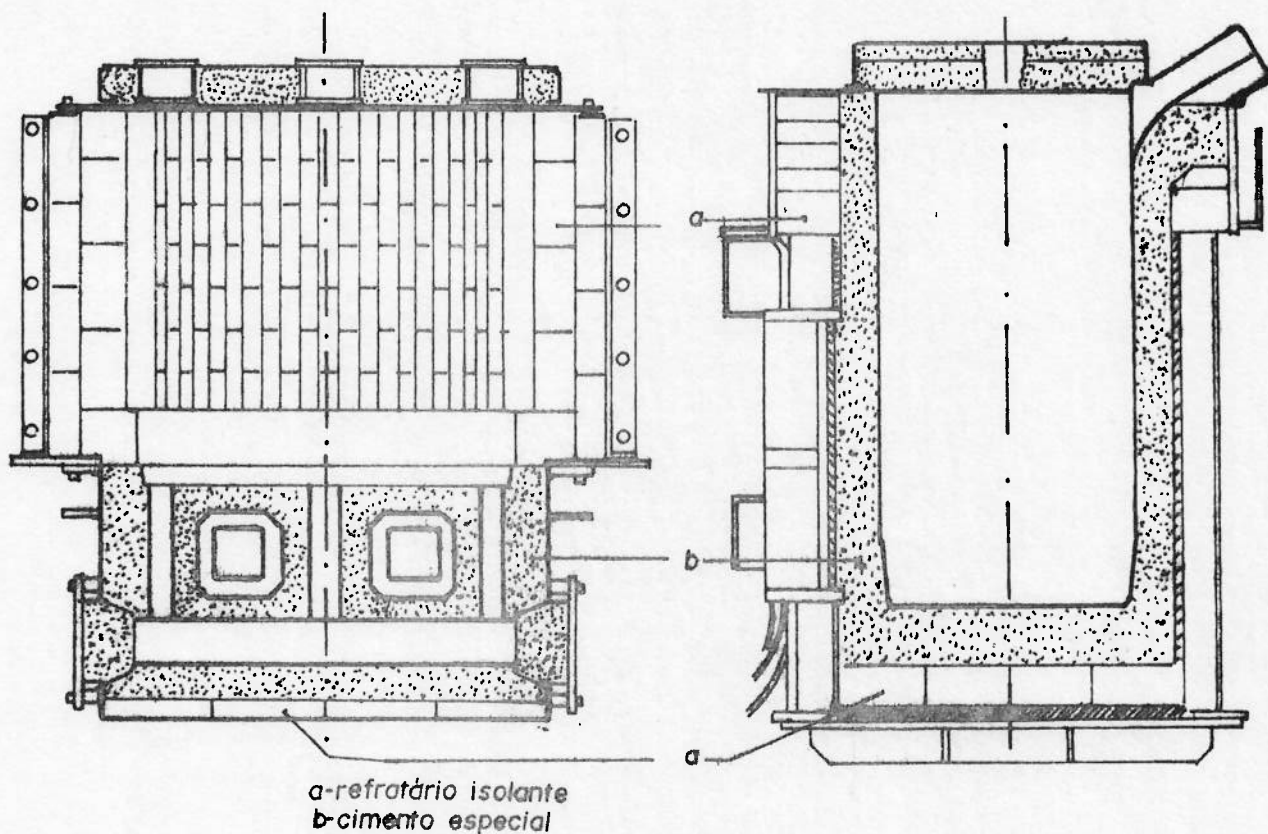
- faixa de temperaturas: 1100º - 1350ºC;
- escolha dos refratários depende do material a ser processado;
- refratários normalmente empregados: básico ou refratário aluminoso combinado com refratário básico.

Obs.: Estes fornos são normalmente empregados em fusão de cobre ou suas ligas (figura 29).





**Fig29- Forno Elétrico de Fusão de Cobre**

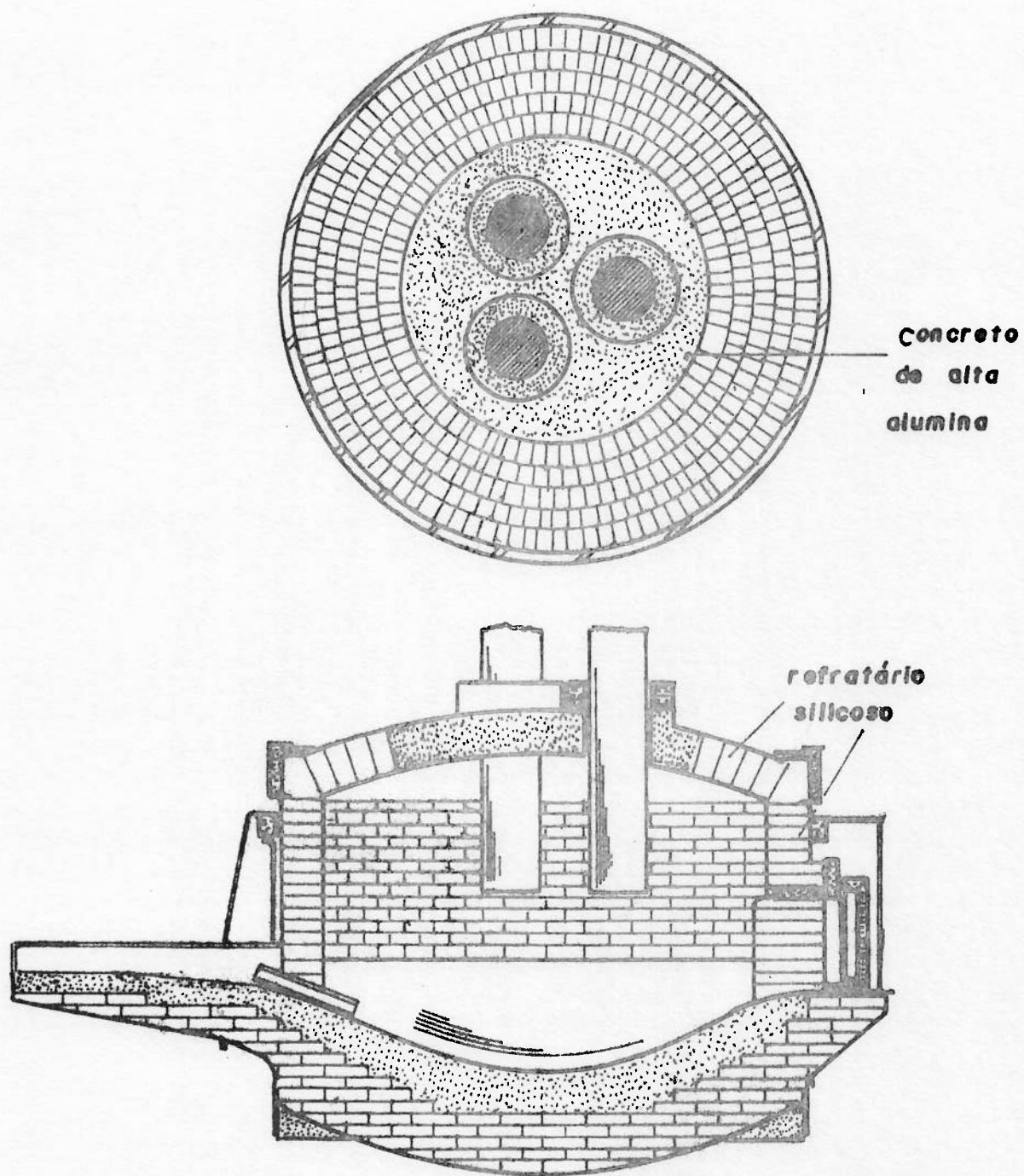


**Fig. 30 Fornos de Indução de Baixa Frequência**

c3) Fornos a indução

- faixa de temperaturas : 1090° - 1760°C;
- escolha dos refratários depende do tipo de material a ser processado, e se o forno é de alta ou baixa frequência;
- refratários normalmente empregados nos fornos de alta frequência: básicos (com alto teor em alumina), ou cromíticos, ou silicosos, ou eventualmente refratários com alto teor de alumina;
- refratários normalmente empregados nos fornos de baixa frequência: monolítico (figura 30) .





**Fig31a-Forno Elétrico de Fusão de Aço**

c4) Fornos a resistência

Os refratários empregados no revestimento de fornos a re sistência são os sílico-aluminosos de alta alumina.

Seguem-se as figuras 31a, 31b, e 31c, que ilus tram o revestimento refratário e isolante de alguns outros tipos de fornos.

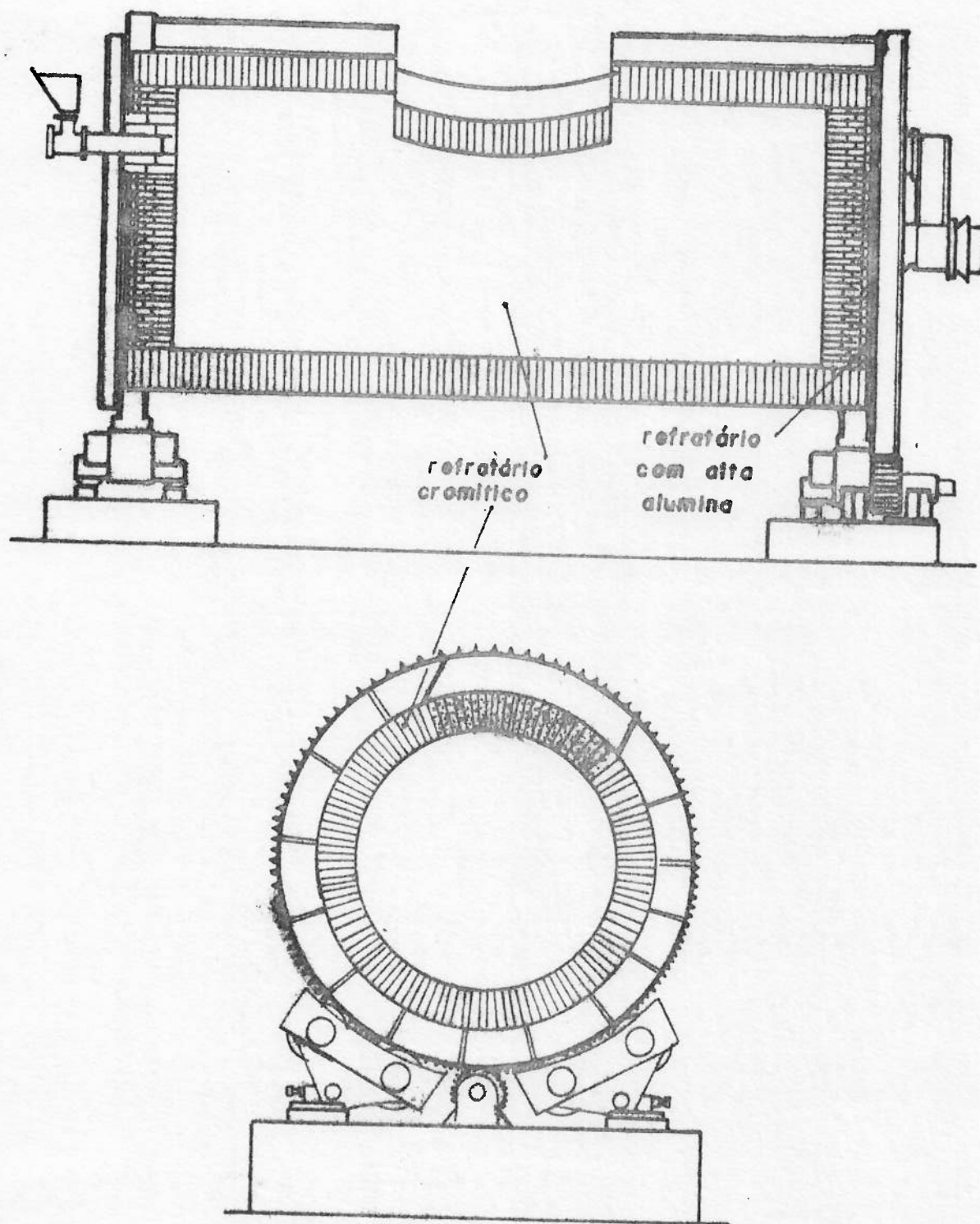


Fig.31b - Conversor de Cobre



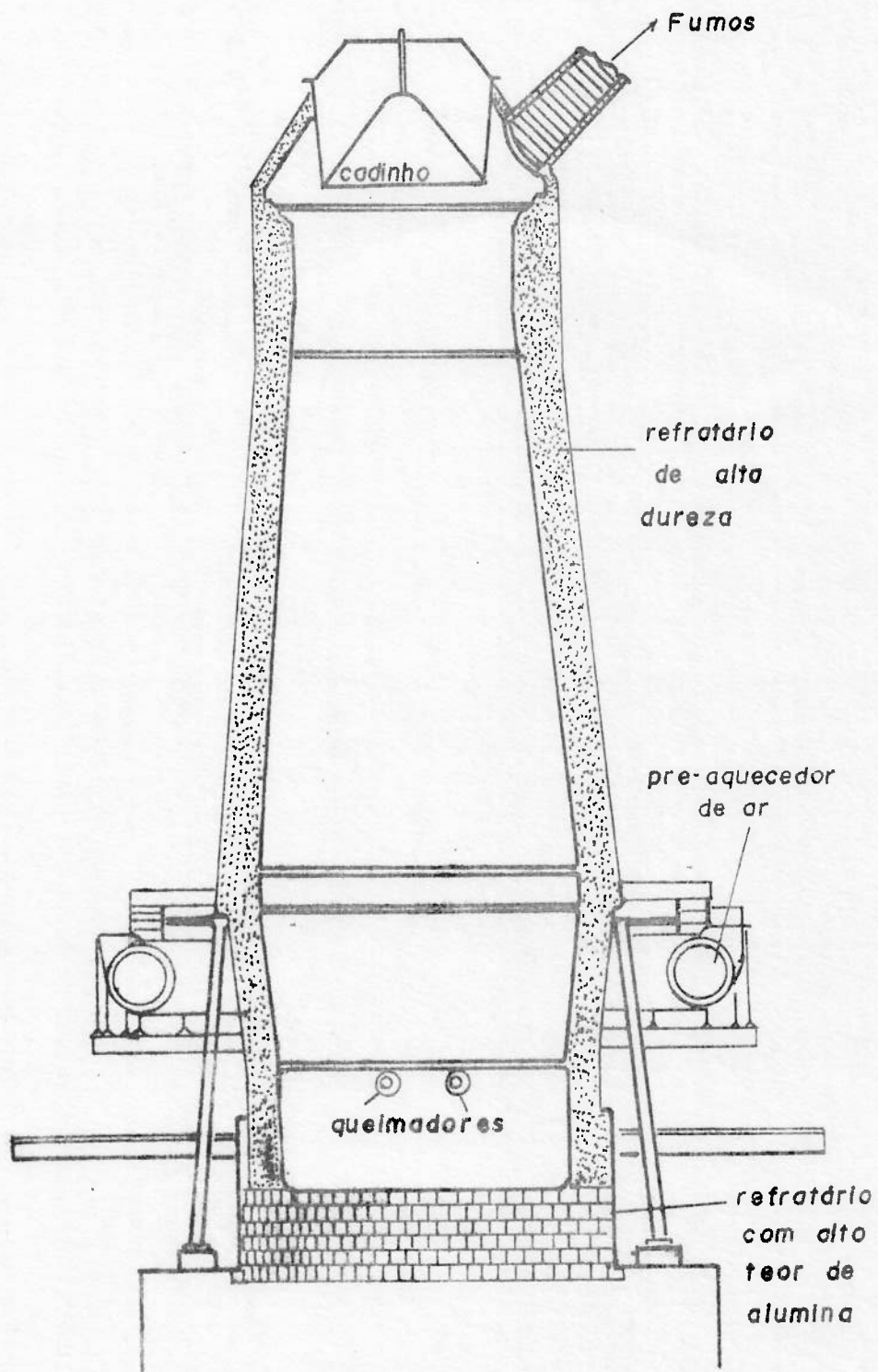


Fig 31c-Alto Forno

Outras informações podem ser vistas nas referências |5|, |7|, |10|, |11|, |19|, |30|, |33|, |35|, |37|, |41|, |47|, |48|, |49|, |65| e |66|.



## CAPITULO VI

ANÁLISE DOS CUSTOS

Os custos importantes na seleção de fornos são os de: viabilidade técnica; implantação; operação e manutenção preventiva (pequenos reparos); refratários e isolantes; manutenção e grandes reparos; depreciação.

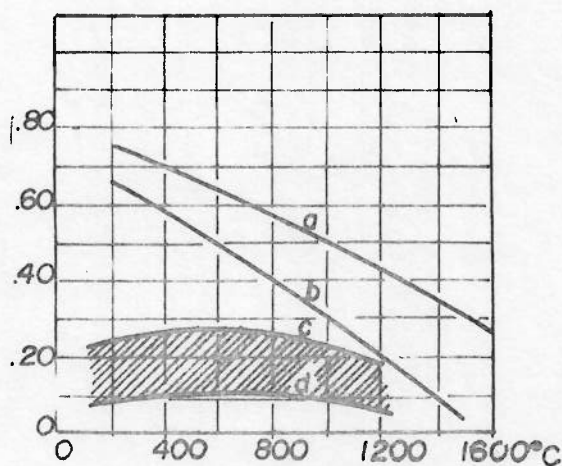
O estudo de todos estes fatores possibilita a avaliação do desempenho econômico de um forno.

Como se sabe, a eficiência termodinâmica ou simplesmente eficiência em fornos a combustão é a razão entre o calor transmitido à carga e o poder calorífico inferior do combustível |64|.

Normalmente a eficiência de fornos é muito baixa quando comparada ao das caldeiras. Enquanto a eficiência das caldeiras se situa entre 60% e 80% ou mais |64|, a eficiência dos fornos a combustão fica entre 9% e 20%. Em condições favoráveis, com: excelente projeto; equipamentos de controle automático de combustão; pessoal altamente qualificado, se pode obter rendimentos de até 60% |64|.

A principal razão dessa diferença de eficiência é a temperatura dos fumos na exaustão. Enquanto nas caldeiras os fumos podem ser resfriados até cerca de 140°C, a alta temperatura da carga nos fornos limita o resfriamento dos produtos da combustão na exaustão. Modernamente, procura-se elevar a eficiência dos fornos aproveitando os fumos no pré-aquecimento da carga, do ar da combustão ou até mesmo do combustível.

A figura 32 compara a eficiência ideal e real dos fornos industriais intermitentes |64|.



**Fig.32** Eficiência ideal e real de fornos industriais intermitentes.

a. Eficiência máxima possível (óleo)

b. Eficiência máxima possível (gás)

c-d Faixa de variação para eficiência reais.

O aproveitamento do calor dos fumos é feito através do emprego de equipamentos de recuperação de calor. Estes equipamentos requerem o emprego de mão de obra qualificada, a qual eleva o custo operacional do forno.

Vamos examinar a seguir os principais itens que constituem o custo do forno.

### 6.1 - Custo de viabilidade técnica do forno

Entende-se por custo de viabilidade técnica do forno ao custo dos cálculos de projeto, do contrato e de desenhos. Normalmente o custo associado a estes fatores depende do tamanho e do detalhamento exigido nos desenhos, porém pode-se dizer que para um mesmo tipo de forno, este custo é proporcional ao tamanho do forno.



## 6.2 - Custo de Implantação

Custo de implantação significa a despesa necessária para aquisição de: refratários e isolantes; elementos estruturais; cimento refratário e argamassa; soldas, materiais específicos; mão de obra qualificada.

O preço dos materiais são controlados pelo Conselho Interministerial de Preços (CIP).

O custo de mão de obra qualificada é estabelecido pela concorrência de mercado entre as firmas especializadas em construção de fornos.

## 6.3 - Custo de Operação e de Manutenção Preventiva (pequenos reparos)

Custo operacional é o despêndio necessário para o processamento da carga, incluindo-se neste o custo: dos equipamentos de manipulação da carga; de mão de obra; de energia (eletricidade ou combustível).

O custo dos equipamentos de manipulação da carga está diretamente relacionado com o mecanismo de transporte da carga, isto é: se a carga será processada automaticamente ou não; e se a carga será transportada manualmente ou com equipamento especializado.

O custo de mão de obra operacional do forno pode ser considerado fixo durante certo período do ano, pois os reajustes salariais são periódicos, conforme Legislação vigente, e a mão de obra requerida não é substancialmente diferente para os diversos tipos de fornos.

O custo do consumo da energia elétrica ou do combustível dependem do desempenho do equipamento empregado no forno e das perdas técnicas.

No processo em que se emprega combustíveis líquidos, o desempenho dos equipamentos depende da nebulização do combustível, da vaporização e da mistura ar-combustível para

desencadeamento da combustão.

No uso de combustíveis gasosos, o desempenho dos equipamentos depende da turbulência e homogeneização da mistura ar-combustível.

No processo de utilização de energia elétrica, o desempenho dos equipamentos depende da localização e disposição dos elementos de aquecimento. Normalmente empregam-se tubos denominados tubos radiantes que contêm em seu interior resistências as quais promovem o aquecimento do forno.

#### 6.4 - Custos dos Refratários e Isolantes

No dimensionamento do revestimento refratário e isolante, influem as propriedades físicas e químicas desses materiais. Como vimos no capítulo IV pode haver mais de um refratário e de um isolante que atendam às condições de operações. Por isso é comum se escolher diversas associações de refratários e isolantes disponíveis para início do projeto. A escolha final recairá sobre a combinação que melhor se adaptar ao projeto, isto é, que satisfaça os requisitos tecnológicos e apresente menor custo.

Os custos do refratário e do isolante dependem: da espessura de cada camada; do número de elementos usados no revestimento; das dimensões dos tijolos ou da manta; e da condutibilidade térmica do material. O processo de avaliação deste custo é reiterativo, já que num primeiro cálculo fica difícil estimar o custo total do refratário e do isolante, pois em geral, a espessura que será efetivamente empregada é desconhecida. Mas, mesmo num primeiro estudo não se restringe a análise descrita ao dispêndio com aquisição desses materiais; deve-se levar em conta os outros custos, como de operação, de manutenção e até o de depreciação.



#### 6.5 Custo de Manutenção e Grandes Reparos

Custo de manutenção e grandes reparos é o custo associado aos gastos com: materiais empregados; mão de obra; tempo no qual o forno deixa de operar.

A frequência e a quantidade de peças substituídas nos reparos depende do modo de operação do forno. Normalmente, o custo associado ao tempo de parada, à mão de obra e ao dispêndio de capital relativo ao material necessário à manutenção é estimado anualmente, e portanto pode ser considerado invariante com a solução em análise.

#### 6.6 - Custo de Depreciação

O custo da depreciação é um sistema que tem por objetivo distribuir o custo ou outro valor básico dos ativos tangíveis de capital, menos o valor residual, pelo período de vida útil da unidade, de forma sistemática e racional [16].

De acordo com as leis e regulamentos federais o custo ou outro valor básico de maquinário e equipamento com vida útil de mais de um ano é um dispêndio de capital, e portanto não pode ser deduzido como despesa no ano de aquisição [16]. Entretanto pode ser deduzida a depreciação por exaustão, desgaste natural e obsolescência da propriedade devido ao uso.

O valor residual é estimado, e é a quantia que se espera obter através da venda quando o ativo é retirado do serviço. Um ativo não pode ser depreciado abaixo do valor residual esperado.

A vida útil estimada que é usada no cálculo da depreciação depende de fatores como: idade na época da compra, política de manutenção e condições de uso.

Os especialistas mencionam seis métodos de depreciação: linear, exponencial, soma dos dígitos, fundo de

amortização, soma inversa dos dígitos e depreciação por exaustão. Detalhes sobre estes métodos podem ser obtidos nas referências |3| e |16|.

No Brasil permite-se qualquer esquema de depreciação, desde que a cota a ser lançada em cada período não ultrapasse o valor determinado pela depreciação linear |16|.

A depreciação é função do período de amortização. Sendo a vida útil dos fornos superior a dez anos, o capital investido em sua aquisição pode ser depreciado em dez anos, face à legislação vigente.

#### 6.7 - Conclusões

A análise de custos determina qual o forno que se deve construir. Como o objetivo da análise é comparar alternativas pode-se, numa primeira estimativa, não considerar a inflação, já que esse fenômeno influi quase igualmente em todas elas.

Considerando os fatores influentes, a decisão deve integrá-los através de técnicas específicas. Tais técnicas de decisão não serão aqui apresentadas, por fugir ao escopo deste trabalho. Mencione-se, entretanto, a título de exemplo, o método da matriz de decisão em que se atribui a cada fator uma nota de mérito.



## CAPITULO VII

MÉTODOS PARA O PROJETO DE FORNOS

Analisam-se a capacidade de aquecimento e perdas em fornos; apresentam-se quatro métodos comumente empregados no projeto de fornos, e um quinto que utiliza a capacidade de cálculo dos computadores e que foi desenvolvido neste trabalho.

7.1 - Capacidade de aquecimento.Variáveis de projeto

Define-se capacidade de aquecimento de um forno usado num dado processo, como o peso de material que pode ser aquecido na unidade de tempo |64|.

A capacidade de aquecimento de um forno depende dos seguintes fatores:

- temperatura das paredes do forno ao se introduzir a carga;
- temperatura a que se deve aquecer a carga;
- temperatura dos produtos de combustão;
- emissividade das paredes do forno;
- emissividade da carga;
- condutibilidade térmica da carga;
- uniformidade de temperatura desejada na carga;
- espessura da carga;
- dimensões do forno;
- velocidade dos gases no forno;
- relação entre as áreas da superfície das paredes e da carga; e
- disposição da carga.

Detalhes sobre cada um destes fatores podem ser vistos na referencia [64].

Nos primeiros anos deste século a capacidade de aquecimento dos fornos foi incrementada com o emprego de aquecimento na parte inferior dos fornos (fig.18). Tais fornos apresentam as seguintes vantagens: eliminação dos pontos frios na parte inferior da carga; redução da temperatura dos gases; proteção da periferia da carga contra a radiação excessiva. A desvantagem para a utilização deste tipo de forno decorre da dificuldade na circulação dos gases.

O forno mufla é um forno que separa a carga dos produtos da combustão por um recipiente metálico de elevada condutibilidade térmica. Nestes fornos a capacidade de aquecimento é função da área superficial e emissividade do material que constitui a mufla. Para dada temperatura de parede, essa capacidade de aquecimento é ligeiramente menor que a do forno de aquecimento direto. A diminuição é devida à ausência de interação direta entre os produtos de combustão e a carga.

A capacidade de aquecimento em fornos de baixa temperatura (inferior a 750°C) pode ser incrementada pela instalação de ventiladores em seu interior.

A capacidade de aquecimento dos fornos contínuos depende preponderantemente: da área da soleira; da temperatura do forno; da emissividade da carga; da relação entre as áreas superficiais da carga e a das paredes do forno.

Nos fornos de processamento descontínuo a temperatura é tal que se impede o sobreaquecimento.

Nos fornos de processamento contínuo a temperatura pode atingir valores mais elevados desde que, se retire prontamente a carga ao se atingir a temperatura desejada.

Por isso, para uma mesma área de soleira os fornos contínuos possuem uma capacidade de aquecimento superior ao dos fornos intermitentes.



## 7.2 - Perdas em fornos

Vamos esquematizar as diversas parcelas que constituem as perdas.

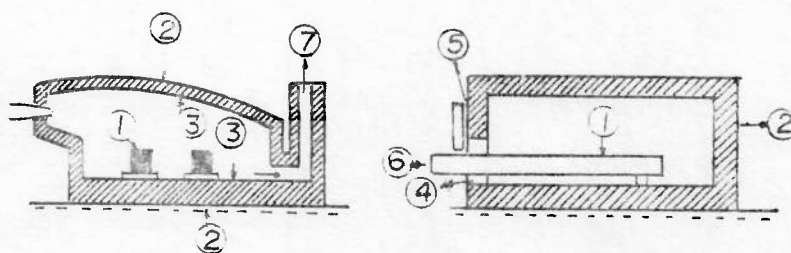


Fig.33 Fluxo calorífico em fornos

Na figura 33 representa-se um forno no qual a combustão se processa do lado esquerdo, e a energia disponível distribui-se por:

- transferência à carga (seta 1);
- eventuais perdas por radiação ao exterior (seta 2);
- eventuais perdas por condução através das paredes do forno (seta 3);
- perdas por frestas e aberturas (seta 4);
- perdas pela abertura de portas (seta 5);
- perdas devido ao movimento da esteira (soleira móvel) (seta 6);
- exaustão dos fumos (seta 7).

No projeto de fornos é importante se considerar as seguintes perdas térmicas: por condução através das paredes do forno; por radiação através de aberturas; pela exaustão dos fumos provenientes da combustão; pela saída dos gases que escapam pelas portas e frestas.

A figura 34 ilustra as isothermas através da soleira e as linhas de fluxo térmico da soleira para o solo.

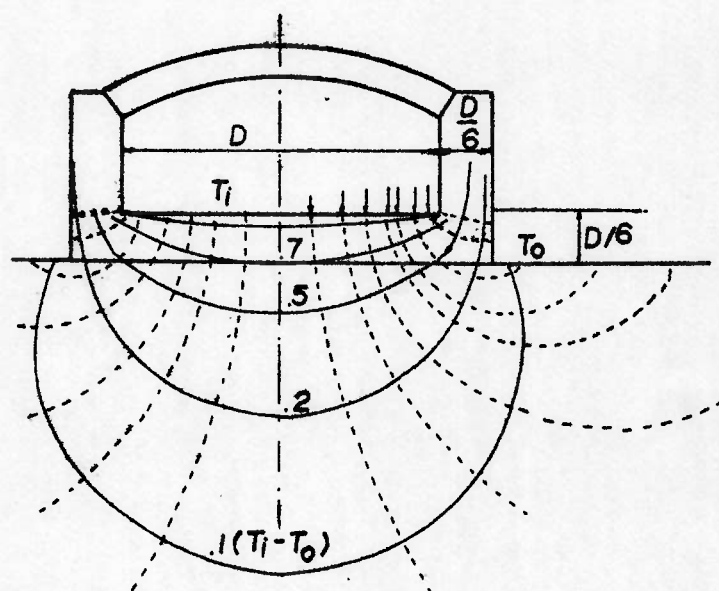


Fig.34 Fluxo catarfílico em soleira (linhas tracejadas). As linhas contínuas são as isothermas.

Alguns aspectos referentes à escolha do revestimento de fornos contínuos já foram comentados em capítulo anterior.

O cálculo da perda de calor por frestas e aberturas de portas em fornos intermitentes é muito complexo. Um método aproximado pode ser visto na referência [7], que utiliza analogia entre o fluxo térmico e o fluxo elétrico, supondo fornos herméticos e considerando constante a condutibilidade térmica do refratário. Nesse método supõe-se que o forno opera sem carga e que o aquecimento do interior do forno se dá à velocidade infinita, devido à não existência de camada limite térmica.

A avaliação das perdas de calor por radiação através de aberturas pode ser feita, por exemplo, pelo método exposto na referência [37], onde se determina a relação matemática entre a radiação total e a radiação direta de um diafragma exposto livremente à radiação. Os resultados são apresentados



em forma de gráficos.

A avaliação da perda de calor pelos gases provenientes de uma combustão incompleta, ou que atravessam aberturas e portas nos fornos de combustão, é difícil, pois estes fornos operam com: ligeira sobrepessão para evitar oxidação da carga; e pequena deficiência de ar no processo de combustão a fim de reduzir as perdas na exaustão.

Uma estimativa das perdas térmicas nos fornos pode ser feita aplicando-se o Primeiro Princípio da Termodinâmica, a partir da temperatura de exaustão dos gases (apêndices A e B).

Para o projeto de fornos deve-se considerar:

- a) as interações térmicas entre os gases, a carga e as paredes do forno;
- b) a escolha conveniente do revestimento refratário, e do isolante;
- c) as perdas térmicas para o meio ambiente pela abertura de portas, pelo sistema de exaustão, ou que atravessam as paredes do forno;
- d) o tempo de aquecimento da carga.

Os itens a), b) e c) já foram examinados; quanto ao item d), ele foge ao escopo deste trabalho, já que admitimos regime permanente; entretanto, os interessados podem encontrar algumas informações, por exemplo, em |13|, |31|, |32|, |35|, |46|, e |57|.

### 7.3 - Quatro métodos para o projeto de fornos

Normalmente utilizam-se hipóteses simplificadoras para o cálculo do revestimento de fornos. Estas simplificações, se não adequadas, podem levar a um mau projeto onerando desnecessariamente os gastos em material, mão de obra e consumo de energia. A experiência anterior, a comparação com fornos em operação e a sensibilidade do engenheiro são de grande valia para evitar soluções ruins.

Apresentam-se a seguir alguns métodos de cálculo no revestimento de fornos. Em todos eles admite-se que a temperatura da face interna do forno é igual à temperatura dos produtos da combustão.

#### 1º Método: Condutibilidade Térmica Constante

Para uma primeira estimativa, bastante grosseira, pode-se escolher os materiais de revestimento, supondo que suas condutibilidades térmicas são constantes.

A partir do interior do forno incrementa-se a espessura de revestimento até que em sua face fria se obtenha condições satisfatórias ao revestimento imediatamente subsequente. Repete-se o processo até se atingir na face externa do forno uma temperatura entre 40°C e 80°C, que é imposta por razões de conforto térmico.

Crítica ao método: ele só pode servir para uma primeira avaliação, já que nas faixas de variação de temperatura em que o revestimento trabalha as condutibilidades térmicas variam e não são constantes; um defeito grave do método é que ele só considera, apesar da restrição acima, um aspecto da adequabilidade tecnológica do revestimento não considerando todos os outros fatores de projeto.

#### 2º Método: Variação Linear da Condutibilidade Térmica

Um refinamento do método anterior considera a condutibilidade térmica do revestimento como uma função da média das temperaturas das faces.

Os detalhes podem ser vistos na referencia |5|.

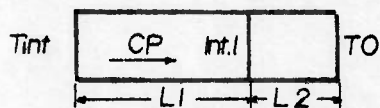
Crítica ao método: embora represente um progresso em relação ao método anterior no que se refere à condutibilidade térmica, prevalece o restante da crítica.



3º Método: Gradiente de Temperaturas em Função da Espessura de Revestimento.

Em vista do cálculo iterativo e laborioso do item anterior alguns fabricantes de refratários e isolantes apresentam tabelas, que fornecem o gradiente de temperaturas através do revestimento em função da espessura considerada. São exemplos as tabelas VII e VIII.

Tint	L1=343mm L2=114mm			L1=229mm L2=114mm			L1=229mm L2= 63mm			L1=114mm L2=114mm		
	Int.1	TO	CP	Int.1	TO	CP	Int.1	TO	CP	Int.1	TO	CP
1540	990	170	2160	1120	185	2540	950	220	3450	1255	200	2900
1400	910	155	1930	1030	170	2200	875	200	3090	1140	190	2670
1300	840	140	1700	950	160	2000	810	190	2700	1060	180	2420
1200	770	135	1520	870	150	1790	740	180	2420	980	170	2250
1100	700	125	1340	790	140	1560	670	165	2130	910	165	2050
1000	630	120	1150	710	125	1350	605	150	1820	820	155	1840
870	555	105	980	630	115	1140	540	135	1560	715	140	1590



L1, L2, Espessuras de revestimento dos refratários tipo 7 e isolante tipo 9 conforme tabela II

CP Calor perdido ao exterior (Kcal/m<sup>2</sup>h)

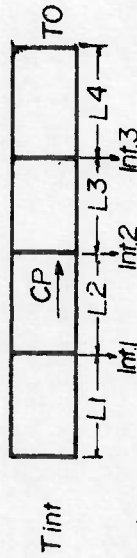
Tint Temperatura interna (°C)

Int.1 Temperatura interface (°C)

TO Temperatura externa (°C)

Tabela VII Algumas combinações de revestimentos usados em fornos.

Tint	L1=114mm(1) L2=1"(Is1)		L1=228mm(1) L2=2"(Is1)		L1=228mm(2) L2=114mm(1) L3=3"(Is1)		L1=228mm(3) L2=153mm(1) L3=1.5"(Is2)		L1=228mm(4) L2=114mm(2) L3=114mm(1) L4=3.5"(Is2)		L1=228mm(7) L2=114mm(2) L3=114mm(1) L4=2.5"(Is3)				
	CP	Int.1	TO	CP	Int.1	TO	CP	Int.1	Int.2	TO	CP	Int.1	Int.2	Int.3	TO
760	500	290	75												
870	610	335	85												
980				400	385	65	340	720	445	60	390	750	315	65	
1100				465	430	75	400	780	500	70	455	840	350	70	
1200				540	475	80	465	895	555	75	535	940	390	80	
1260				580	500	85	500	940	580	77	570	985	410	80	
1320					540	985	610	80	615	85	475	1080	900	74	
1370					580	1030	635	83	665	88	505	1125	945	76	
1430									710	90	540	1175	990	80	
1480									760	95	575	1225	1030	82	
1540									810	100	620	1275	1070	84	
1650															
1760															



Tint Temperatura interna do forno (9C)  
 Int1 Temperatura da primeira interface (9C)  
 Int2 Temperatura da segunda interface (9C)  
 Int3 Temperatura da terceira interface (9C)  
 CP Calor perdido (Kcal/h m<sup>2</sup>)

Li Espessura da i-ésima camada (mm) (-os dados entre parenteses, após as espessuras Li, se referem ao tipo de material empregado, conforme especificado na tabela II).

TABELA VIII Alguns refratários e isolantes empregados no revestimento de fornos.

Crítica ao método: a principal vantagem deste método é a rapidez dos cálculos. Uma desvantagem é a imprecisão da avaliação dos fluxos térmicos através das paredes. Outra é a necessidade de interpolações porque as temperaturas previstas raramente co incidirão com as tabeladas. Uma terceira desvantagem é que as combinações refratário/isolante apresentadas pelos fabricantes podem não ser as mais adequadas para o projeto que se está desenvolvendo. Finalmente fatores como: interações térmicas entre os gases, a carga e as paredes do forno; perdas para o meio ambiente devidas a aberturas de portas ou pelo sistema de exaustão, não são considerados.

Informações complementares estão nas referências |4|, |9|, |11|, |15|, |29|, |54|, |55|, e |65|.

#### 4º Método: Uso de Gráficos (Trinks)

Transcreve-se o procedimento apresentado na referência |64|.

Primeiramente considere-se a situação de um único revestimento.

Conhecida a condutibilidade térmica de um certo revestimento, para cada temperatura da face interna, pode-se construir uma curva da temperatura da face externa em função do fluxo de calor que atravessa a parede, tomando-se como parâmetro a espessura da parede. Na figura |35| são apresentadas curvas deste tipo para quatro espessuras (curva 1).

Por outro lado, conhecida a emissividade da face externa da parede, pode-se construir a chamada curva de emissividade, que é o fluxo de calor irradiado pela face, em função da temperatura da face externa.

A intersecção da curva 1 (para uma dada espessura de parede) com a curva de emissividade determina tanto o fluxo de calor como a temperatura da face externa.



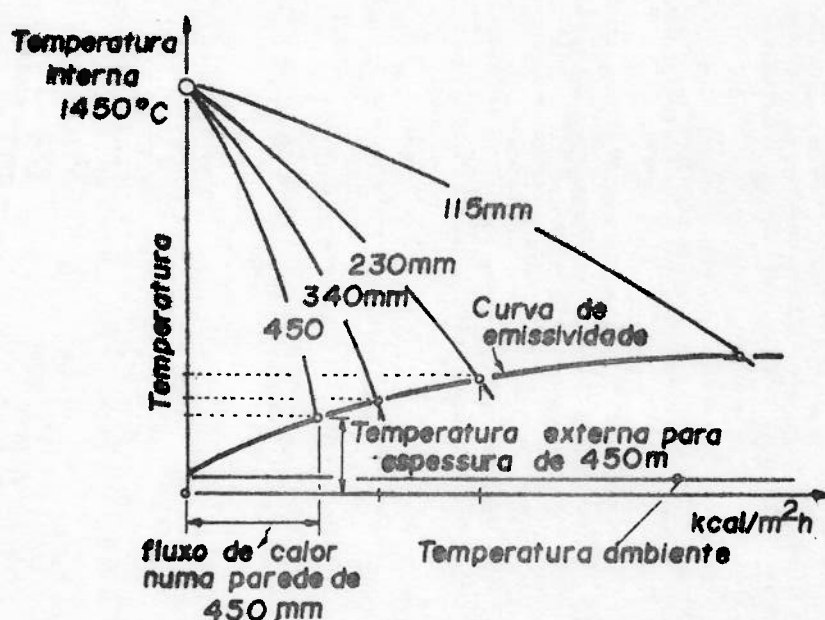


Fig.35 Método gráfico para calcular as perdas de calor através de paredes homogêneas

Uma situação mais complexa é aquela na qual se considera a existência de múltiplos revestimentos, quando se torna conveniente empregar pelo menos um dos papéis transparentes. Vamos ilustrar o método para duas camadas: uma de isolante, outra de refratário, com auxílio da figura 36.

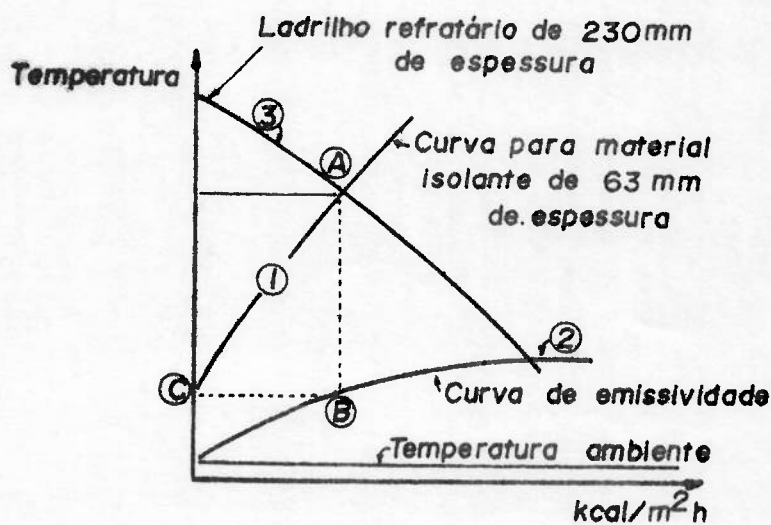


Fig.36 Método gráfico para calcular as perdas de calor através de paredes compostas

Numa folha de papel transparente desenhamos: os eixos de temperatura (vertical), de fluxo de calor (horizontal), e a curva 1 que representa o fluxo de calor em função da temperatura, para um material isolante e uma dada espessura.

No outro papel desenhamos um par de eixos, sendo que o do fluxo térmico tem sentido oposto ao do desenho anterior. Nele, representamos a curva de emissividade do material isolante (curva 2), e o fluxo térmico em função da temperatura do material refratário com dada espessura (curva 3).

Coloca-se os dois eixos de temperatura no mesmo sentido. A intersecção da curva 1 com a curva 3 é um ponto A. Movimenta-se horizontalmente a transparência até que a vertical em A determine na curva 2 o ponto B, e a horizontal que passa por este ponto intercepte a curva 1 exatamente no ponto C, que é a intersecção da curva 1 com o eixo das temperaturas. Obtém-se, então, três informações: temperatura da interface (temperatura do ponto A); fluxo térmico (correspondente ao ponto B); temperatura da face externa (ponto C).

Crítica ao método: nem sempre se possui gráficos que atendam a toda a gama de temperaturas da face interna do forno e espessuras de revestimento, bem como gráficos para todas as associações de revestimentos refratários e isolantes, o que pode exigir a elaboração continuada de novos gráficos; pode-se pensar em estender o método para três camadas, mas se ele já é intrincado para duas camadas, imagine-se para três...

Informações complementares sobre este método podem ser encontradas nas referências |33| e |64|.

#### 7.4 - Proposta de um método para o projeto de fornos com o uso do computador.

Face às críticas que apresentamos aos métodos anteriores, desenvolveu-se um procedimento que além de levar em conta as interações térmicas entre as diversas superfícies internas do forno, a carga, e os gases, também considera o custo do

revestimento e o custo da energia. O método proposto pode ser usado para muitas camadas (na forma atual do programa até dez camadas, número que pode ser facilmente ampliado).

O objetivo é dimensionar a isolação térmica de um forno que minimize o custo global.

Define-se custo global como a soma do custo da energia multiplicado pelo período de operação previsto (ao valor atual), com o custo do revestimento.

Como o método envolve a solução de equações não lineares, o procedimento é facilitado pelo uso do computador.

As hipóteses adotadas são as seguintes:

1. Os gases no interior do forno são não luminosos, pois; supõe-se que os combustíveis queimados são líquidos.
2. Considera-se a opacidade do dióxido de carbono e do vapor d'água no interior do forno.
3. A quantidade de ar a ser empregada na combustão garante a queima completa do combustível.
4. Serão considerados os custos relativos aos refratários e isolantes e o custo do combustível.
5. Não são considerados os custos de: implantação; operação; manipulação da carga; manutenção e reparo; depreciação, porque todos estes custos podem ser considerados invariantes uma vez escolhido o forno e o modo de processamento. Os efeitos da inflação, também, não são considerados.
6. As paredes dos fornos serão consideradas re-radiantes.
7. As emissividades da carga, do refratário, e dos isolantes serão considerados invariantes com a temperatura. São consideradas variáveis as emissividades de dióxido de carbono e do vapor d'água.
8. Não se considera a penetração de gases frios no interior do forno.



9. Admite-se que a temperatura dos produtos da combustão na zona de aquecimento da carga é a temperatura da combustão adiabática, corrigida por um fator de eficiência.
10. A carga está disposta simetricamente no interior do forno.
11. A operação é em regime estacionário.
12. O fluxo calorífico perdido para o ambiente é obtido considerando-se a troca térmica por radiação e convecção entre a face externa do forno e o meio.

O método de cálculo desenvolvido inicia-se com a indicação dos códigos dos materiais refratários e isolantes que se deseja empregar.

Os passos seguintes são:

1. Cálculo da temperatura adiabática de combustão (Apêndice B).
2. Considerando-se interações de radiação entre faces do forno, carga e fumos, calcula-se a matriz de transferência (equação 35).
3. Com a matriz de transferência calcula-se a potência emissiva ( $E_r$ ) de cada face do forno (equação 37).
4. Determinam-se: a temperatura de cada face interna do forno pela equação 16; o fluxo para o exterior a partir da temperatura da face externa e da temperatura ambiente, cujo cálculo será visto a seguir (equação 41).
5. Para os materiais que constituirão a isolamento do forno verifica-se se são tecnicamente viáveis, isto é, se a temperatura a que serão submetidos é menor que a máxima especificada pelo fabricante.
6. Para cada solução viável calcula-se o custo global.
7. Escolhe-se a de mínimo custo.

O fluxo de calor para o meio ambiente é calculado de acordo com a hipótese 12. A equação que representa esta perda pela face  $i$  (figura 37) é:

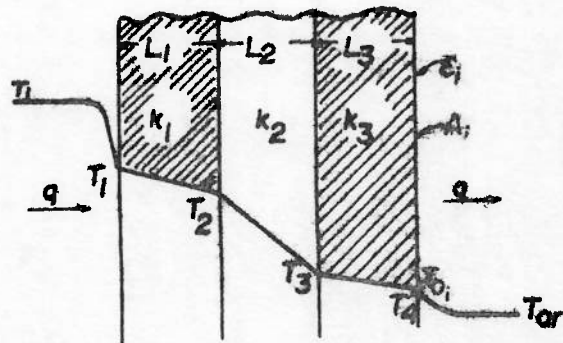


Fig.37 Distribuição de temperaturas através de parede plana composta

$$Q_{\text{perdido}_i} = h_{\text{ext}} A_i (T_{o_i} - T_{\text{Ar}}) + \sigma \epsilon_i A_i (T_{o_i}^4 - T_{\text{Ar}}^4) \quad (41)$$

No regime estacionário este calor perdido (equação 41) é igual ao fluxo de calor que atravessa a parede do forno, e é obtido ou pela equação 5 ou pela 7. A equação 5 é aplicável a paredes planas e a 7 se aplica a fornos cilíndricos.

A equação 7 pode ser colocada na forma da equação 5, fazendo:

$$e_i = \frac{d_{\text{ext}}}{2} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \quad (42)$$

isto é

$$q_{\text{cil}} = \frac{T_{\text{int}_i} - T_{o_i}}{\sum \frac{e_i}{K_i}} \quad (43)$$

$$\text{onde } e_i = \frac{1}{2} \left( d_{\text{int}} + 2 \sum_{j=1}^n \text{esp}_j \right) \ln \frac{d_{\text{int}} + 2 \sum_{j=1}^i \text{esp}_j}{d_{\text{int}} + 2 \sum_{j=1}^i \text{esp}_j} \quad (44)$$

A solução de (44) é obtida por tentativa e erro.

Note-se que o valor de  $e_i$  dado pela relação (44) não é, geralmente, a espessura.

A condição de regime estacionário do fluxo calorífico através das paredes do forno é a igualdade das equações (41) e (43) isto é:

$$\frac{T_{\text{int}_i} - T_{o_i}}{\sum \frac{e_i}{K_i}} = h_{\text{ext}} (T_{o_i} - T_{\text{Ar}}) + \sigma \epsilon_i (T_{o_i}^4 - T_{\text{Ar}}^4) \quad (45)$$

e, denominando-se  $B = \sum \frac{e_i}{K_i}$  (resistência térmica do revestimento) tem-se:

$$B = \frac{T_{\text{int}_i} - T_{o_i}}{h_{\text{ext}} (T_{o_i} - T_{\text{Ar}}) + \sigma \epsilon_i (T_{o_i}^4 - T_{\text{Ar}}^4)} \quad (46)$$

onde o índice  $i$  refere-se a  $i$ -ésima face em estudo.

Segundo [11] para o ar vale a relação

$$h_{\text{ext}} = 1,0690 (T_o - T_{\text{Ar}})^{1/3} \left( \frac{\text{Kcal}}{\text{hm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \right) \text{ se } 10^6 < \text{Pr.Gr} < 10^{12} \quad (47)^*$$

A condição de aplicabilidade da equação (47) é sempre verificada em fornos quando se tem convecção natural.

Para convecção forçada valem as relações (13) (14) ou (15), que fornecem o adimensional Nu em função do número de Reynolds.

Com  $h_{\text{ext}}$  assim calculado obtém-se o valor de B (equação 46).

Impondo-se a conservação de energia a cada camada escrevem-se as igualdades (ver figura 37):



$$\frac{T_{\text{int}} - T_1}{\frac{e_1}{K_1}} = \frac{T_{\text{int}} - T_0}{B} \quad (48a)$$

$$\frac{T_1 - T_2}{\frac{e_2}{K_2}} = \frac{T_{\text{int}} - T_0}{B} \quad (48b)$$

⋮

$$\frac{T_{n-1} - T_0}{\frac{e_n}{K_n}} = \frac{T_{\text{int}} - T_0}{B} \quad (48n)$$

A solução do sistema de equações (48) é obtido por tentativa e erro, visto que não conhecemos a espessura de cada camada e nem a temperatura de cada interface.

Como as espessuras dos materiais de revestimento disponíveis no mercado variam discretamente, o programa utiliza esse valor ou os seus múltiplos.

O cálculo se desenvolve da equação (48a) para a equação (48n).

A temperatura obtida para a face fria de cada camada deve ser aceitável pela camada subsequente.

Uma vez especificados quais os materiais que se deseja utilizar, existem várias combinações de revestimentos, mas não muitas, que satisfazem às limitações de temperatura. Cada combinação possível é analisada pelo programa e classificada como admissível ou não admissível. Solução não admissível é aquela em que resulta alguma espessura negativa ou uma temperatura de face maior que a especificada para os materiais; as demais soluções são admissíveis. Ao longo do processamento, quando se verifica que uma solução é não admissível, o cálculo é interrompido e se passa a examinar a combinação seguinte. O exame das soluções prossegue até se esgotar todas. Calcula-se o custo de cada solução admissível e seleciona-se a de mínimo custo global.

O custo do fluxo de calor perdido (CFCP) é calculado pelo custo do combustível necessário para gerá-lo. Portanto:

$$\text{CFCP (Cr\$/hora)} = \frac{Q_{\text{perd.}}}{\text{massa}_{\text{comb}}} \cdot \frac{\text{custo}_{\text{comb}}}{\Delta H_{\text{forn}}} \quad (49)$$

onde  $Q_{\text{perd}}$  é o calor perdido para o exterior

$\Delta H_{\text{forn}}$  é o calor fornecido por kg de combustível

$\text{custo}_{\text{comb}}$  é o custo do combustível

$\text{massa}_{\text{comb}}$  é a massa de combustível capaz de gerar o calor necessário ao processo num determinado intervalo de tempo (kg/hora).

Como um dos dados de entrada do programa é a discriminação dos materiais, o engenheiro deve valer-se da experiência anterior, própria ou de terceiro, na indicação destes. Na falta de experiência, alguma informação costuma ser obtida procurando levar em conta tanto as boas características do material (relação da isolamento pelo volume de revestimento) como o custo dele, multiplicando-se ambos os fatores, isto é:

$$Z = \frac{\text{condutibilidade térmica do refratário}}{\text{volume do revestimento}} \cdot \text{custo do revestimento}$$

Entre dois materiais, considera-se melhor o que tiver menor Z.

## CAPÍTULO VIII

O PROGRAMA DE COMPUTADOR PARA O PROJETO DE FORNOS

Para calcular a espessura do revestimento de fornos, que torne mínimo o custo global, desenvolveu-se um programa em linguagem FORTRAN IV - nível G.

O programa efetua os cálculos de acordo com a metodologia proposta no item 7.4.

A seguir comenta-se o programa principal e suas sub-rotinas. Apresentam-se também, exemplos de aplicação. No apêndice G encontra-se o programa, inclusive suas sub-rotinas.

8.1 - O PROGRAMA

O programa se compõe de um programa principal e quatorze sub-rotinas.

As sub-rotinas usadas são denominadas: COTIR, RADIA, ENERG, EMISS, TLIM, FAFOR, SUBST, TACOM, FLUTE, NERAP; além dessas dez sub-rotinas desenvolvidas para este trabalho, são utilizadas quatro sub-rotinas de pacote: ARRAY, GMPRD, GMTRA, - MINV, desenvolvidas pela IBM e destinadas respectivamente para:

**Sub-rotina ARRAY:** converte o formato de uma matriz(nxn) no formato ( $n^2 \times 1$ ).

**Sub-rotina GMPRD:** efetua o produto de duas matrizes quadradas.

**Sub-rotina GMTRA:** calcula a transposta de uma matriz.

**Sub-rotina MINV:** inverte uma matriz.

O programa principal além de possibilitar a entrada de informações, chama as sub-rotinas, calcula as espessuras de revestimento e imprime o relatório de saída.



As sub-rotinas desenvolvidas para este trabalho efetuam os seguintes cálculos:

Sub-rotina COTIR: calcula em função da temperatura média a condutibilidade térmica dos isolantes e dos refratários (apresentados na tabela I).

Sub-rotina RADIA: calcula a matriz de transferência, o vetor excitação e a temperatura de cada face interna do forno. Estes cálculos são efetuados a partir de informações fornecidas pelas sub-rotinas ENER $G$ , EMISS, que são apresentadas a seguir.

Sub-rotina ENER $G$ : calcula as propriedades termodinâmicas do combustível, propriedades estas que serão utilizadas nas sub-rotinas RADIA e EMISS.

Sub-rotina EMISS: calcula a partir das informações fornecidas pela sub-rotina ENER $G$ , a emissividade dos fumos no interior do forno.

Sub-rotina TLIM : é usada para efetuar comparações com a temperatura limite que cada material pode suportar, e que constam das tabelas VIA e VIB.

Sub-rotina FAFOR: calcula alguns fatores de forma para fornos cilíndricos, através das dimensões fornecidas pelo programa principal. Outros fatores de forma já estão incorporados na sub-rotina RADIA.

Sub-rotina SUBST: substitui uma coluna da matriz de transferência pelo vetor excitação.

Sub-rotina TACOM: calcula a temperatura adiabática de combustão.

Sub-rotina FLUTE: calcula o fluxo térmico através das paredes do forno e as temperaturas interfaces dos revestimentos.

Sub-rotina NERAP: obtém a raiz de uma equação pelo método de Newton-Raphson.

Os dados fornecidos ao programa principal são:

- temperatura do meio externo (K)
- velocidade do ar ambiente (m/s)
- emissividade da carga
- temperatura de aquecimento da carga (K)
- tipo de combustível
- custo do combustível (Cr\$/kg)
- temperatura de admissão do combustível (K)
- excesso de ar (%)
- eficiência do processo de combustão (%)
- formato do forno (cilíndrico ou paralelepipedico)
- índice de ocupação do volume interno do forno (%)
- se forno paralelepipedico, a altura, a profundidade e a largura (m)
- se forno cilíndrico, a altura e o diâmetro (m)
- período de operação do forno (horas/dias/meses/anos)
- pressão no interior do forno (Pa)
- emissividade da face interna do forno
- emissividade da face externa do forno
- temperatura máxima da face externa (K)
- número de camadas de isolamento de cada face
- refratários e isolantes selecionados para o revestimento de cada face (do interior para o exterior do forno)
- preço dos elementos de revestimento (Cr\$/elemento)
- comprimento de cada elemento de revestimento (m)
- largura de cada elemento de revestimento (m)
- espessura de cada elemento de revestimento (m)

O programa processado no Centro de Computação Eletrônica da Universidade de São Paulo, no computador Burroughs B-6700 apresentou os seguintes tempos, para resolver quatro problemas:

I/O 5,6 segundos

CPU 26,2 segundos

No texto acima e no programa foram usadas as seguintes convenções (fig. 38).



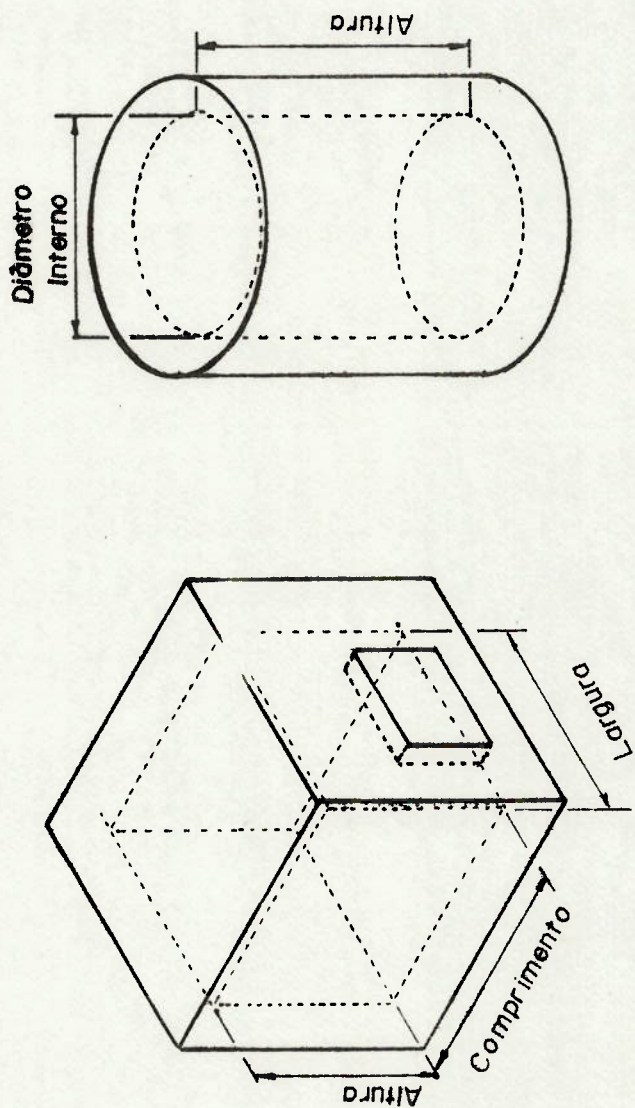


Fig.38 Convenções para o relatório de saída do computador



## 8.2- O FLUXOGRAMA

Neste item apresenta-se o fluxograma do programa, com a sequência de cálculos feitos pelo computador. A apresentação é esquemática. Como já se disse o programa está no anexo H. Os detalhes das sub-rotinas estão na seção anterior (item 8.1).

Examinaremos o fluxograma, com o objetivo de esclarecer como se obtém a composição de cada face (fig. 39).

O procedimento é iniciado com o fornecimento dos dados, os quais possibilitam a obtenção da temperatura de cada face interna do forno.

Suponhamos que se pretenda aplicar  $n$  tipos de revestimento numa dada face (no caso atual do programa  $n \leq 5$ ).

Inicialmente é verificado se o material especificado como revestimento interno suporta a temperatura interna prevista para aquela face. Se não suporta, é impresso um relatório, e o programa é encerrado. Se suporta, o procedimento prossegue calculando-se a espessura inicial do revestimento, supondo que se utilizará o primeiro material especificado como único constituinte. Podemos, então, calcular o custo necessário para este revestimento.

Verifica-se se existem outras associações de revestimentos propostos. Se não existem, é impressa a solução, que por ser única, é a de mínimo custo, e o processo é encerrado. Se existem outras associações, prossegue-se considerando o elemento mais interno e o imediatamente seguinte (do interior para o exterior do forno). Nesta situação, entre as eventuais combinações possíveis, escolhe-se as que são admissíveis (ver capítulo VII). Para cada solução admissível calcula-se o custo.

Procede-se assim sucessivamente, até que se tenha examinado todos os possíveis pares de revestimentos especificados.

A próxima etapa é considerar os ternos de materiais; repete-se, para eles, o procedimento descrito para os

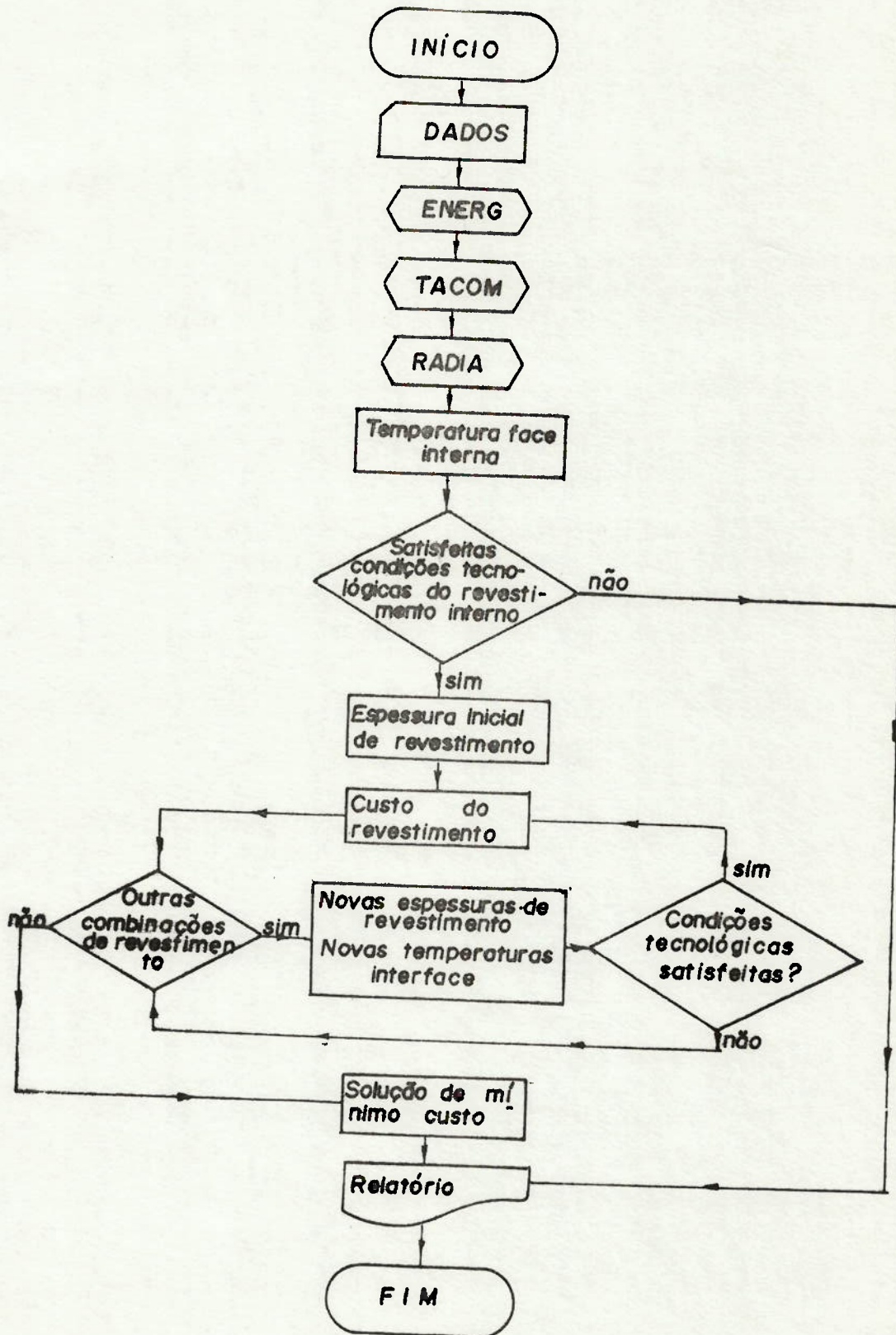


FIG. 39 FLUXOGRAMA



pares. O programa prevê a possibilidade de se empregar até cinco tipos de materiais.

Escolhe-se então, dentre todas as soluções admissíveis, aquela que corresponda ao mínimo custo global. Imprime-se o relatório e o processo é encerrado.

### 8.3 - APLICAÇÕES

Apresentamos a seguir quatro exemplos resolvidos.



CALCULO DE UM FORNO

PROBLEMA 1

DADOS

TEMPO DE OPERACAO

HORAS .....	22
DIAS .....	22
MESES .....	14
ANOS .....	14

CONDICOES AMBIENTES

TEMPERATURA DO AR (K) .....	293.16
VELOCIDADE DO AR (M/S) .....	2.64

CARGA

EMISSIVIDADE .....	0.94
TEMPERATURA DE AQUECIMENTO (K)	1109.00

COMBUSTAO

TIPO DE COMBUSTIVEL .....	BTB
CUSTO DO COMBUSTIVEL (CRS/KG)	3.14
TEMPERATURA DE ADMISSAO (K) ..	333.16
EXCESSO DE AR (%) .....	20.00
EFICIENCIA (%) .....	75.00

FORNO

FORMATO .....	PARALELEPIPEDICO
PORCENTAGEM OCUPADA DO VOLUME (%)	85.00
ALTURA (M) .....	5.75
COMPRIMENTO (M) .....	11.00
LARGURA (M) .....	3.50

RADIAÇAO

PRESSAO INTERNA DO FORNO (PA) .	107800.00
EMISSIVIDADE FACE INTERNA .....	0.50
EMISSIVIDADE FACE EXTERNA .....	0.74
TEMPERATURA MAX. FACE EXTERNA(K)	373.16

REVESTIMENTO

NUMERO DE CAMADAS .....	3		
MATERIAIS (CODIGOS) .....	1	4	IS=6
PRECO (CRS/ELEMENTO) .....	19.00	29.69	520.00
COMPRIMENTO (M) .....	0.23	0.24	0.76
ALTURA (M) .....	0.08	0.08	0.61
ESPESSURA (M) .....	0.11	0.11	0.03

SOLUCOES

\*\*\*\*\*  
 SOLUCAO NA FACE 1  
 TEMPERATURA INTERNA (K) ..... 1184.94  
 FLUXO TERMICO (WATTS) ..... 50066.75

REVESTIMENTO CODIGO	1	9	IS=6
TEMPERATURA FACE INTERNA (K) .....	1184.94	964.84	342.29
TEMPERATURA FACE EXTERNA (K) .....	964.84	342.29	342.29
TOTAL DE CAMADAS .....	3	2	0
ELEMENTOS NECESSARIOS .....	10314	6876	0
ESPESSURA DE REVESTIMENTO (M) .....	0.33	0.22	0.00
CUSTO (CRS) .....	195906.00	204148.44	0.00

\*\*\*\*\*  
 SOLUCAO NA FACE 2  
 TEMPERATURA INTERNA (K) ..... 1179.59  
 FLUXO TERMICO (WATTS) ..... 15817.67

REVESTIMENTO CODIGO	1	9	IS=6
TEMPERATURA FACE INTERNA (K) .....	1179.59	960.91	341.96
TEMPERATURA FACE EXTERNA (K) .....	960.91	341.96	341.96
TOTAL DE CAMADAS .....	3	2	0
ELEMENTOS NECESSARIOS .....	3282	2166	0
ESPESSURA DE REVESTIMENTO (M) .....	0.33	0.22	0.00
CUSTO (CRS) .....	62358.00	64961.72	0.00

\*\*\*\*\*  
 SOLUCAO NA FACE 3  
 TEMPERATURA INTERNA (K) ..... 1158.78  
 FLUXO TERMICO (WATTS) ..... 32550.16

REVESTIMENTO CODIGO	1	9	IS=6
TEMPERATURA FACE INTERNA (K) .....	1158.78	1002.17	345.20
TEMPERATURA FACE EXTERNA (K) .....	1002.17	345.20	345.20
TOTAL DE CAMADAS .....	2	2	0
ELEMENTOS NECESSARIOS .....	4186	4186	0
ESPESSURA DE REVESTIMENTO (M) .....	0.22	0.22	0.00
CUSTO (CRS) .....	79584.00	124252.34	0.00

\*\*\*\*\*  
 CUSTO DE REVESTIMENTO (CRS) (PARA UMA VIDA DE 58080.(HOR)  
 FACE 1 (CRS) ..... 400114.44  
 FACE 2 (CRS) ..... 127319.72  
 FACE 3 (CRS) ..... 243816.34

TOTAL (CRS) ..... 1402501.00

\*\*\*\*\*  
 BALANCO TERMICO  
 TEMPERATURA ADIABATICA DE COMBUSTAO 1226.21 K  
 PERDA TOTAL PELAS FACES WATTS 196869.17

CALCULO DE UM FORNO

PROBLEMA 2

DADOS

TEMPO DE OPERACAO

HORAS .....	24
DIAS .....	22
MESES .....	14
ANOS .....	14

CONDICOES AMBIENTES

TEMPERATURA DO AR (K) .....	293.16
VELOCIDADE DO AR (M/S) .....	2.66

CARGA

EMISSIVIDADE .....	0.96
TEMPERATURA DE AQUECIMENTO (K)	1109.66

COMBUSTAO

TIPO DE COMBUSTIVEL .....	BTE
CUSTO DO COMBUSTIVEL (CRS/KG)	3.16
TEMPERATURA DE ADMISSAO (K) ..	333.16
EXCESSO DE AR (%) .....	20.66
EFICIENCIA (%) .....	75.66

FORNO

FORMATO .....	PARALELEPIPEDICO
PORCENTAGEM OCUPADA DO VOLUME (%)	85.66
ALTURA (M) .....	5.75
COMPRIMENTO (M) .....	11.66
LARGURA (M) .....	3.56

RADIAÇÃO

PRESSAO INTERNA DO FORNO (PA) ..	107800.66
EMISSIVIDADE FACE INTERNA .....	0.56
EMISSIVIDADE FACE EXTERNA .....	0.76
TEMPERATURA MAX. FACE EXTERNA(K)	373.16

REVESTIMENTO

NUMERO DE CAMADAS .....	3		
MATERIAIS (CODIGOS) .....	1	6	IS=6
PRECO (CRS/ELEMENTO) .....	19.00	33.66	520.00
COMPRIMENTO (M) .....	0.23	0.23	0.76
ALTURA (M) .....	0.08	0.40	0.61
ESPESSURA (M) .....	0.11	0.14	0.03



SOLUCOES

\*\*\*\*\*  
 SOLUCAO NA FACE 1  
 TEMPERATURA INTERNA (K) ..... 1184.94  
 FLUXO TERMICO (WATTS) ..... 48894.49

REVESTIMENTO CODIGO	1	8	IS=6
TEMPERATURA FACE INTERNA (K) .....	1104.94	1113.96	341.39
TEMPERATURA FACE EXTERNA (K) .....	1113.96	341.39	341.39
TOTAL DE CAMADAS .....	1	2	0
ELEMENTOS NECESSARIOS .....	3436	6876	0
ESPESSURA DE REVESTIMENTO (M) .....	0.11	0.22	0.00
CUSTO (CRS) .....	65322.00	232752.00	0.00

\*\*\*\*\*  
 SOLUCAO NA FACE 2  
 TEMPERATURA INTERNA (K) ..... 1179.59  
 FLUXO TERMICO (WATTS) ..... 15432.08

REVESTIMENTO CODIGO	1	8	IS=6
TEMPERATURA FACE INTERNA (K) .....	1179.59	1109.13	341.03
TEMPERATURA FACE EXTERNA (K) .....	1109.13	341.03	341.03
TOTAL DE CAMADAS .....	1	2	0
ELEMENTOS NECESSARIOS .....	1094	2188	0
ESPESSURA DE REVESTIMENTO (M) .....	0.11	0.22	0.00
CUSTO (CRS) .....	20706.00	74063.60	0.00

\*\*\*\*\*  
 SOLUCAO NA FACE 3  
 TEMPERATURA INTERNA (K) ..... 1158.78  
 FLUXO TERMICO (WATTS) ..... 32025.74

REVESTIMENTO CODIGO	1	8	IS=6
TEMPERATURA FACE INTERNA (K) .....	1158.78	1158.78	344.33
TEMPERATURA FACE EXTERNA (K) .....	1158.78	344.33	344.33
TOTAL DE CAMADAS .....	0	2	0
ELEMENTOS NECESSARIOS .....	0	4186	0
ESPESSURA DE REVESTIMENTO (M) .....	0.00	0.22	0.00
CUSTO (CRS) .....	0.00	141696.10	0.00

\*\*\*\*\*  
 CUSTO DE REVESTIMENTO (CRS) (PARA UMA VIDA DE 58080.(HOR)  
 FACE 1 (CRS) ..... 298074.60  
 FACE 2 (CRS) ..... 44849.80  
 FACE 3 (CRS) ..... 141696.10

TOTAL (CRS) ..... 109241.00

\*\*\*\*\*  
 BALANCO TERMICO  
 TEMPERATURA ADIABATICA DE COMBUSTAO 1226.21 K  
 PERDA TOTAL PELAS FACES WATTS 192705.82

## CALCULO DE UM FORNO

## PROBLEMA 3

## DADOS

TEMPO DE OPERACAO		
HORAS .....		10
DIAS .....		20
MESES .....		12
ANOS .....		5
CONDICAOES AMBIENTES		
TEMPERATURA DO AR (K) .....		293.16
VELOCIDADE DO AR (M/S) .....		2.00
CARGA		
EMISSIVIDADE .....		0.65
TEMPERATURA DE AQUECIMENTO (K)		1084.30
COMBUSTAO		
TIPO DE COMBUSTIVEL .....		BTE
CUSTO DO COMBUSTIVEL (CR\$/KG)		3.10
TEMPERATURA DE ADMISSAO (K) ...		323.16
EXCESSO DE AR (%) .....		20.00
EFICIENCIA (%) .....		85.00
FORNO		
FORMATO .....		CILINDRICO
PORCENTAGEM OCUPADA DO VOLUME (%)		50.00
ALTURA (M) .....		1.00
DIAMETRO (M) .....		1.00
RADIACAO		
PRESSAO INTERNA DO FORNO (PA) .		107800.00
EMISSIVIDADE FACE INTERNA .....		0.50
EMISSIVIDADE FACE EXTERNA .....		0.70
TEMPERATURA MAX. FACE EXTERNA(K)		353.16
REVESTIMENTO		
NUMERO DE CAMADAS .....	2	
MATERIAIS (CODIGOS) .....	9	12.5
PRECO (CR\$/ELEMENTO) .....	29.69	1035.00
COMPRIMENTO (M) .....	0.23	0.70
ALTURA (M) .....	0.08	0.61
ESPESSURA (M) .....	0.11	0.03

SOLUCOES

\*\*\*\*\*  
 SOLUCAO NA FACE 1  
 TEMPERATURA INTERNA (K) ..... 1144.20  
 FLUXO TERMICO (WATTS) ..... 569.52

REVESTIMENTO CODIGO	9	IS=5
TEMPERATURA FACE INTERNA (K) .....	1144.20	329.55
TEMPERATURA FACE EXTERNA (K) .....	329.55	329.55
TOTAL DE CAMADAS .....	3	0
ELEMENTOS NECESSARIOS .....	513	0
ESPESSURA DE REVESTIMENTO (M) .....	0.33	0.00
CUSTO (CRS) .....	15250.97	0.00

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*  
 SOLUCAO NA FACE 2  
 TEMPERATURA INTERNA (K) ..... 1095.17  
 FLUXO TERMICO (WATTS) ..... 397.00

REVESTIMENTO CODIGO	9	IS=5
TEMPERATURA FACE INTERNA (K) .....	1095.17	325.53
TEMPERATURA FACE EXTERNA (K) .....	325.53	325.53
TOTAL DE CAMADAS .....	4	0
ELEMENTOS NECESSARIOS .....	172	0
ESPESSURA DE REVESTIMENTO (M) .....	0.44	0.00
CUSTO (CRS) .....	5106.68	0.00

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*  
 CUSTO DE REVESTIMENTO (CRS) (PARA UMA VIDA DE ..... 18600.(HOR)  
 FACE 1 (CRS) ..... 7615.49  
 FACE 2 (CRS) ..... 5106.68

TOTAL (CRS) ..... 25444.33  
 \*\*\*\*\*  
 BALANCO TERMICO  
 TEMPERATURA ADIABATICA DE COMBUSTAO ..... 1363.90 K  
 PERDA TOTAL PELAS FACES WATTS ..... 1935.84



## CALCULO DE UM FORNO

## PROBLEMA 4

## DADOS

TEMPO DE OPERAÇÃO		
HORAS .....		10
DIAS .....		15
MESES .....		12
ANOS .....		10
CONDIÇÕES AMBIENTES		
TEMPERATURA DO AR (K) .....		293.16
VELOCIDADE DO AR (M/S) .....		4.70
CARGA		
EMISSIVIDADE .....		0.90
TEMPERATURA DE AQUECIMENTO (K)		1546.50
COMBUSTÃO		
TIPO DE COMBUSTÍVEL .....		BTE
CUSTO DO COMBUSTÍVEL (CR\$/KG)		3.10
TEMPERATURA DE ADMISSÃO (K) ..		333.16
EXCESSO DE AR (%) .....		10.00
EFICIÊNCIA (%) .....		96.00
FORNO		
FORMATO .....	PARALELEPÍPEDICO	
PORCENTAGEM OCUPADA DO VOLUME (%)		85.00
ALTURA (M) .....		5.70
COMPRIMENTO (M) .....		11.00
LARGURA (M) .....		3.50
RADIÇÃO		
PRESSÃO INTERNA DO FORNO (PA) .		107800.00
EMISSIVIDADE FACE INTERNA .....		0.50
EMISSIVIDADE FACE EXTERNA .....		0.75
TEMPERATURA MÁX. FACE EXTERNA (K)		373.16
REVESTIMENTO		
NUMERO DE CAMADAS .....	2	
MATERIAIS (CÓDIGOS) .....	8	15.0
PREÇO (CR\$/ELEMENTO) .....	33.85	520.00
COMPRIMENTO (M) .....	0.23	0.76
ALTURA (M) .....	0.08	0.61
ESPESSURA (M) .....	0.11	0.11

SOLUCOES

\*\*\*\*\*  
SOLUCAO NA FACE 1  
TEMPERATURA INTERNA (K) ..... 1623.65  
FLUXO TERMICO (WATTS) ..... 49197.52

A FACE NAO PODE SER CONSTRUIDO  
COM O MATERIAL ESPECIFICADO

\*\*\*\*\*  
SOLUCAO NA FACE 2  
TEMPERATURA INTERNA (K) ..... 1615.54  
FLUXO TERMICO (WATTS) ..... 15533.73

A FACE NAO PODE SER CONSTRUIDO  
COM O MATERIAL ESPECIFICADO

\*\*\*\*\*  
SOLUCAO NA FACE 3  
TEMPERATURA INTERNA (K) ..... 1580.57  
FLUXO TERMICO (WATTS) ..... 28605.93

A FACE NAO PODE SER CONSTRUIDO  
COM O MATERIAL ESPECIFICADO

\*\*\*\*\*

## CALCULO DE UM FORNO

## PROBLEMA 4

## DADOS

TEMPO DE OPERACAO		
HORAS .....		10
DIAS .....		15
MESES .....		12
ANOS .....		10
CONDICOES AMBIENTES		
TEMPERATURA DO AR (K) .....		293.10
VELOCIDADE DO AR (M/S) .....		4.70
CARGA		
EMISSIVIDADE .....		0.90
TEMPERATURA DE AMUECIMENTO (K)		1546.50
COMBUSTAO		
TIPO DE COMBUSTIVEL .....		B7E
CUSTO DO COMBUSTIVEL (CR\$/KG)		3.10
TEMPERATURA DE ADMISSAO (K) ..		333.10
EXCESSO DE AR (%) .....		10.00
EFICIENCIA (%) .....		96.00
FORNO		
FORMATO .....	PARALELEPIPEDICO	
PORCENTAGEM OCUPADA DO VOLUME (%)		85.00
ALTURA (M) .....		5.75
COMPRIMENTO (M) .....		11.00
LARGURA (M) .....		3.50
RADIAAO		
PRESSAO INTERNA DO FORNO (PA) .		107800.00
EMISSIVIDADE FACE INTERNA .....		0.50
EMISSIVIDADE FACE EXTERNA .....		0.70
TEMPERATURA MAX. FACE EXTERNA(K)		373.10
REVESTIMENTO		
NUMERO DE CAMADAS .....	2	
MATERIAIS (CODIGOS) .....	11	15.00
PRECO (CR\$/ELEMENTO) .....	34.76	520.00
COMPRIMENTO (M) .....	0.23	0.70
ALTURA (M) .....	0.06	0.61
ESPESSURA (M) .....	0.11	0.11



SOLUCOES

\*\*\*\*\*

SOLUCAO NA FACE 1

TEMPERATURA INTERNA (K) ..... 1623.65  
FLUXO TERMICO (WATTS) ..... 46168.04

REVESTIMENTO CODIGO

11 IS=6  
TEMPERATURA FACE INTERNA (K) ..... 1623.65 451.31  
TEMPERATURA FACE EXTERNA (K) ..... 451.31 323.09  
TOTAL DE CAMADAS ..... 7 1  
ELEMENTOS NECESSARIOS ..... 24066 137  
ESPESSURA DE REVESTIMENTO (M) ..... 0.77 0.11  
CUSTO (CRS) .... 836504.16 71240.00

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

SOLUCAO NA FACE 2

TEMPERATURA INTERNA (K) ..... 1615.54  
FLUXO TERMICO (WATTS) ..... 15573.95

REVESTIMENTO CODIGO

11 IS=6  
TEMPERATURA FACE INTERNA (K) ..... 1615.54 562.56  
TEMPERATURA FACE EXTERNA (K) ..... 562.56 324.76  
TOTAL DE CAMADAS ..... 6 2  
ELEMENTOS NECESSARIOS ..... 6564 86  
ESPESSURA DE REVESTIMENTO (M) ..... 0.66 0.22  
CUSTO (CRS) .... 228104.64 45760.00

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

SOLUCAO NA FACE 3

TEMPERATURA INTERNA (K) ..... 1580.57  
FLUXO TERMICO (WATTS) ..... 28688.69

REVESTIMENTO CODIGO

11 IS=6  
TEMPERATURA FACE INTERNA (K) ..... 1580.57 578.23  
TEMPERATURA FACE EXTERNA (K) ..... 578.23 320.41  
TOTAL DE CAMADAS ..... 6 2  
ELEMENTOS NECESSARIOS ..... 12550 166  
ESPESSURA DE REVESTIMENTO (M) ..... 0.66 0.22  
CUSTO (CRS) .... 436516.08 86320.00

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

CUSTO DE REVESTIMENTO (CRS) (PARA UMA VIDA DE 27900.(HOR)  
FACE 1 (CRS) ..... 907774.16  
FACE 2 (CRS) ..... 273924.04  
FACE 3 (CRS) ..... 522636.08

TOTAL (CRS) ..... 3409069.16

\*\*\*\*\*

BALANCO TERMICO

TEMPERATURA ADIABATICA DE COMBUSTAO . 1606.58 K  
PERDA TOTAL PELAS FACES WATTS 160862.95

## CAPÍTULO IX

CONCLUSÕES

Neste capítulo serão analisados os resultados do trabalho e sugeridos novos desenvolvimentos.

O método proposto considera as interações por radiação entre superfícies re-radiantes, na presença de gás não luminoso.

Como se expôs anteriormente, ao contrário do que se faz usualmente, isto é, admitir conhecida a temperatura da face interna do forno, aqui parte-se das condições de queima do combustível. Esse método é mais geral do que o proposto pela ASTM|5|, pois, nesse são supostas conhecidas as espessuras de revestimento, e no nosso, tais espessuras resultam do processamento.

O modelo é baseado nas considerações apresentadas nos capítulos II, III, IV, V e VI, e nas hipóteses simplificadas constantes no capítulo VII. O programa foi apresentado no capítulo VIII.

No programa são fornecidas informações sobre a vida do forno, o que permite minimizar o custo "global", isto é, o custo do revestimento e também o devido ao uso de combustível.

O programa ainda fornece como saída: a quantidade de material empregado por face; a vida operacional do forno; os custos de revestimento para cada material empregado por face; o custo total do revestimento por face; o custo total do revestimento do forno; e o fluxo total de energia perdida.

Foram selecionados quatro exemplos de aplicação:

- o primeiro é de um forno paralelepipedico existente e que opera bem próximo às condições dos dados;
- o segundo é o forno anterior, com modificações na especificação do revestimento;

- o terceiro é de um forno cilíndrico;
- o quarto é um forno paralelepípedo para o qual se especificou materiais inadequados.

Consideremos o primeiro exemplo. Ele foi resolvido com o intuito de se comparar alguns dos resultados obtidos com os encontrados no forno real.

Na tabela são apresentados alguns valores determinados no processamento e os medidos no forno.

Face	Nº 1 Modelo			Nº 2 Modelo			Nº 3 Modelo			Nº 2 Real		
	1	9	IS-6	1	9	IS-6	1	9	IS-6	1	9	IS-6
Código do material	1	9	IS-6	1	9	IS-6	1	9	IS-6	1	9	IS-6
Temp.Face int. (K)	1185	964,8	--	1179,6	960,9	--	1158,8	1002,2	--	1168	--	--
Temp.Face ext. (K)	964,8	342,3	--	960,9	341,9	--	1002,2	345,2	--	--	333	--
Espes. revest. (m)	0,33	0,22	0	0,33	0,22	0	0,22	0,22	0	0,33	0,22	0

As diferenças de temperaturas entre duas faces contíguas para camadas do mesmo material são devidas não só ao fator de forma, mas também, às imprecisões nos cálculos inerentes ao uso do computador.

É importante comparar as espessuras de revestimento de uma face para a outra. Como se vê na tabela, as espessuras de revestimento da face nº1 e da face nº2 são as mesmas, enquanto que para a face nº3, o programa fornece como saída de processamento uma espessura menor.

A justificativa para essa variação é que com as espessuras dadas ficou satisfeita a temperatura máxima especificada para a face externa do forno, do modo mais econômico.



De fato, pode-se notar que as temperaturas das faces internas do material de código 1 é maior nas faces nº 1 e nº 2 do que na nº 3; assim, imaginando-se que fossem usadas nas faces mais quentes duas camadas do material código 1, com 0,11m de espessura cada, seriam possíveis as seguintes alternativas:

a) duas camadas adicionais do material de código 9; resultaria uma temperatura da face externa acima do máximo especificado;

b) três camadas adicionais do material de código 9; resultaria um custo superior ao efetivamente encontrado.

Portanto, a diferença para menos de 20K na face nº 3 permite que se utilize uma camada a menos do material de código 1.

Embora especificado, o material código IS-6 não foi utilizado.

A tabela anterior também mostra que, quando um material não é usado, a temperatura da face interna do revestimento coincide com a temperatura da face externa, correspondendo a uma espessura zero.

Obviamente, os materiais satisfazem às condições tecnológicas de emprego.

A tabela permite comparar o forno processado pelo programa com a face nº 2 do forno real: verifica-se que os resultados não diferem significativamente; a maior discrepância porcentual de temperaturas para a face interna é de 1,5% e para a face externa é de 2,7%, que do ponto de vista técnico é mais do que razoável. As espessuras das faces nº 2 também coincidem.

Quanto às faces nº 1 e 3 do forno real somente temos informações sobre o seu revestimento, que é idêntico ao da face nº 2. Comparando-os com os obtidos no processamento, verifica-se que na face nº 1 as espessuras utilizadas são idênticas, enquanto que na face nº 3, a espessura do material código 9 é menor no modelo processado do que no real.

Como se pode ver nas saídas com computador para os vários exemplos, os resultados não diferem significativamente de face para face. Por isso, doravante, concentrar-se-á

a atenção na solução da face mais aquecida, supostamente a mais desfavorável.

O segundo exemplo constitui-se do forno anterior, com modificações na especificação dos materiais de revestimento. Aqui serão empregados os materiais de códigos 1; 8; IS-6; isto é, o material de código 8 substituiu o de código 9. Os objetivos foram de verificar qual a economia ou o dispêndio adicional na aquisição de material e comparar o fluxo térmico com o do problema anterior.

O resultado do processamento para a face mais aquecida foi:

Código do material	1	8	IS-6
Temp.Face Interna (K)	1185	1114	----
Temp.Face Externa (K)	1114	341,4	----
Espes. Revestim. (m)	0,11	0,22	0

Os revestimentos foram especificados nas dimensões mais vendidas no comércio.

O material IS-6, embora especificado não foi utilizado.

O material código 1 é um refratário; os 8 e 9 são refratários isolantes; o IS-6 é um isolante. Com o uso do material código 8, consegue-se um revestimento mais delgado; no primeiro exemplo, a espessura total de revestimento é de 0,55m; no segundo exemplo é de 0,33m. A mão de obra para o assentamento de tijolos fica reduzida.

O fluxo térmico perdido através das paredes e o custo do revestimento são os seguintes:

Exemplo	Nº1	Nº2	$\Delta(1-2)$
Fluxo Térmico (watt)	196869,20	192705,80	4163,4
Custo Revest. (Cr\$ )	1462501,00	1069241,00	393260,00

O exame da tabela anterior mostra que:

- no segundo exemplo, tem-se uma economia de Cr\$393.260,00 em revestimento; assim para construir o forno, se gastará 73,11% do que seria dispendido se fosse construído o forno do exemplo 1;
- as perdas se reduzem de 4.163,4 watt em relação às do primeiro exemplo; supondo o custo do watt perdido como ....  $4,28 \times 10^{-6}$  Cr\$/ (watt.s) tem-se uma economia adicional de 0,018 Cr\$/s, o que corresponde, no período de dez anos a uma economia em combustível de Cr\$3.731.624,50 a preço de Cr\$3,10/kg de combustível.

Entretanto, deve-se lembrar que, para certas aplicações, como no caso da carga não ser depositada sobre o piso, mas ser lançada sobre este, dependendo da vida que se de seja para o forno, o material código 8 pode ser inadequado, já que apresenta menor resistência mecânica, e à abrasão do que o de código 9.

Pode-se ainda comparar, conforme equação 49, o valor Z para os materiais de revestimento nos dois exemplos, em (watt.Cr\$)/(m.k).

Código do material	1	8	9
1º Exemplo	3,782	--	1,49
2º Exemplo	3,783	2,52	--

A pequena diferença no valor de Z nos dois exemplos para o material nº 1, decorre do fato dele depender da condutibilidade térmica, a qual não é a mesma nos dois exemplos.

Se fosse levado em conta o critério mencionado após a equação 49, a solução a ser adotada seria a do primeiro exemplo, entretanto, como se viu, se ambas soluções forem admissíveis, a segunda é melhor. Deve-se notar que o preço unitário do material código 8 é mais caro que o do código 9, apesar disso a segunda solução é mais econômica.



O terceiro exemplo foi proposto para exibir os resultados do processamento de um forno cilíndrico.

O resultado para face mais aquecida (cilíndrica) foi:

Código do material	9	IS-5
Temp. Face inter. (K)	1144,3	----
Temp. Face Exter. (K)	329,5	----
Espes. Revestim. (m)	0,33	----

Neste exemplo não foi especificado material refratário. Foi especificado para o revestimento um refratário isolante de código 9 e um isolante de código IS-5. As dimensões dos elementos de revestimento fornecidas como dados de entrada são as dimensões dos produtos mais comercializados.

Note-se que mais uma vez, o material IS-5 não foi empregado. Uma explicação para este fato pode ser encontrada quando se compara o valor de  $Z$  para este material ( $Z=3,204$ ) com o dos demais materiais refratários isolantes e isolantes.

Entretanto, convém lembrar que o emprego desse tipo de material é aconselhável quando se utiliza pequenos fornos destinados a rápidos aquecimentos da carga, nos quais a capacidade calorífica do forno pode ser baixa.

A relação do raio externo do forno revestido e o raio crítico é de 2,03. Veja-se, a propósito, o apêndice G.

O quarto exemplo tem a finalidade de apresentar o resultado do processamento quando os materiais especificados são incompatíveis com as temperaturas envolvidas.

A versão 4-A é a tentativa de utilizar os revestimentos de códigos 8 e IS-6. Como se vê na solução, nenhum desses materiais pode ser utilizado, já que as temperaturas da face interna são superiores a 1600k.

A versão 4-B apresenta o mesmo problema resolvido, quando se especifica materiais adequados. No caso optou-se pelos de código 11 e IS-6, e obteve-se como solução:

Material Código	11	IS-6
Temp. Face Interna (K)	1623,6	451,3
Temp. Face Externa (K)	451,3	323,1
Espes. Revestimento (m)	0,77	0,11

Finalmente, para encerrar o exame dos exemplos, vamos considerar em cada um deles a diferença entre a temperatura mais alta da face interna do forno e o da carga.

	1º Exemplo	2º Exemplo	3º Exemplo	4º Exemplo
Temperatura carga (K)	1109	1109	1084	1546
Temp. Face Inter. (K)	1185	1185	1144	1623
Diferença Temper. (K)	76	76	60	77

Examinando-se essa tabela, nota-se que as diferenças de temperaturas obtidas no processamento estão na faixa em que se encontram os valores empiricamente verificados, isto é, entre 30 e 70K.

A discussão desses exemplos permite concluir que o modelo proposto e o programa desenvolvido permitem satisfazer o objetivo anteriormente proposto. Mas, algumas considerações adicionais podem ser acrescentadas.

Com o uso de um artifício, pode-se incluir os efeitos de perdas por portas e aberturas. Para tal, bastaria aumentar as dimensões da carga (em cerca de 3% a 5%).

Outra modificação, que pode facilmente ser feita, é introduzir a emissividade da superfície do revestimento como função da temperatura. Nessas condições, o processo de determinação da temperatura da face do forno, em vista da equação 35, tornar-se-á reiterativo.

Uma terceira modificação que pode ser feita é aquela em que determinado material venha a ser utilizado obri -



gatoriamente. Esta situação corresponderia, por exemplo, a algum requisito tecnológico. A modificação pode ser feita calculando-se as temperaturas que resultariam da aplicação de uma camada daquele material de uso obrigatório. A partir daí, adotadas as temperaturas obtidas como novos dados, o procedimento prosseguirá normalmente. Ressalve-se os casos de incompatibilidade tecnológica, cujo processamento o programa faria abortar.

Uma versão simplificada do programa pode ser feita para aplicação a fornos elétricos, já que nestes, a ausência de vapores d'água e de dióxido de carbono permitem tratar o ar ambiente como um gás perfeito e transparente e, substituindo-se o resultado obtido através da combustão pela energia dissipada pelos elementos de aquecimento.

Embora não pareçam relevantes do ponto de vista abordado neste trabalho, poder-se-ia aperfeiçoar o programa, levando-se em contra fenômenos como:

- o equilíbrio químico da reação no cálculo da temperatura real de combustão;
- o fluxo térmico através das quinas formadas pelo revestimento de paredes contíguas.

Outro desenvolvimento permitido por este programa, é o de se calcular, após a obtenção do revestimento ótimo, a estrutura de sustentação do forno.

Outras linhas de abordagem permanecem abertas à pesquisa:

- projeto do forno em que se considera as trocas por convecção entre carga, gases, e paredes interiores do forno, além do gradiente de temperatura desde a câmara de combustão até o topo da carga, o que permitiria resolver outros tipos de fornos não abrangidos neste trabalho (como os alto-fornos);
- queima de combustíveis que produzem chamas luminosas, o que permitiria estender o método para fornos que queimam



sem não sã combustíveis derivados do petróleo, mas outros, convencionais ou não, como o coque, bagaço de cana, lenha, etc ;

- estudo de fornos em regime transitório, incluindo os que operam intermitentemente;
- finalmente, o desenvolvimento de um programa que trouxesse implicitamente critérios para: selecionar os materiais em que sucessão deveriam ser empregados; a disposição dos elementos em cada camada; e a escolha do forno de menor custo global.

APÊNDICE A - BALANÇO ENERGÉTICO DA COMBUSTÃO

Este anexo mostra como se pode obter a entalpia dos produtos e o calor trocado com o meio, durante a combustão.

Quando uma reação ocorre em sistema fechado, na ausência de efeitos cinéticos, gravitacionais e outros, não realizando trabalho externo além do de expansão do sistema, e à pressão constante, o primeiro princípio da termodinâmica permite escrever:

$$Q = \Delta H \quad (50)$$

onde  $Q$  é o calor trocado, e  $\Delta H$  a variação da entalpia, durante a reação.

Quando os reagentes são fornecidos a  $18^\circ\text{C}$  e  $1\text{atm}$ , e os produtos são finalmente levados a  $18^\circ\text{C}$  e  $1\text{atm}$ , o valor que se obtém é a entalpia-padrão de reação [20] que se representa por

$$\Delta H^\circ = \Delta H_{18}^\circ = \sum H_{P_{18}}^\circ - \sum H_{R_{18}}^\circ \quad (51)$$

onde:  $\sum H_{P_{18}}^\circ$  é a soma das entalpias dos produtos a  $18^\circ\text{C}$ , tomada tal temperatura como referência e  $\sum H_{R_{18}}^\circ$  é a soma das entalpias dos reagentes a  $18^\circ\text{C}$ . Notar que na temperatura de referência de  $18^\circ\text{C}$  a entalpia dos elementos pode não ser zero.

A entalpia-padrão de reação é encontrada na literatura especializada para reações químicas que ocorrem à temperatura de  $18^\circ\text{C}$  e pressão atmosférica padrão. Além de  $18^\circ\text{C}$  existem tabelas que adotam, para temperatura de referência, outros valores entre  $18^\circ\text{C}$  e  $25^\circ\text{C}$ .

Para temperaturas diferentes da padrão, a variação de entalpia pode ser calculada por:

$$\Delta H = \sum H_P(T_2) - \sum H_R(T_1), \quad (52)$$

onde:  $\sum H_P(T_2)$  é a soma das entalpias dos produtos na temperatura  $T_2$ , existente ao fim da reação;

$\Sigma H_R(T_1)$  é a soma das entalpias dos reagentes na temperatura  $T_1$ , temperatura de admissão dos reagentes.

Um exemplo de aplicação [20] ilustra as idéias apresentadas.

A composição de um gás é: 4,8% de  $\text{CO}_2$ ; 27,0% de  $\text{CO}$ ; 0,4% de  $\text{O}_2$ ; 1,9% de  $\text{CH}_4$ ; 14,1% de  $\text{H}_2$  e 51,8% de  $\text{N}_2$ . Queima-se o gás com 50% de excesso de ar. O gás e o ar são secos, e a temperatura resultante da combustão é 1093°C. Os reagentes são supridos a 16°C. Desprezando perdas de calor através das paredes da fornalha, calcular o calor transferido à carga.

Solução: (usando o Sistema Internacional de Unidades)

Base de cálculo 100 kmol de gás:

$$\text{CO}_2 \text{ nos fumos} = 4,8 + 27,0 + 1,9 = 33,7$$

$$\text{O}_2 \text{ teórico} = \frac{27}{2} + 2 \cdot 1,9 + \frac{14,1}{2} - 0,4 = 23,95$$

$$\text{O}_2 \text{ empregado} = 1,5 \cdot 23,95 = 35,95$$

$$\text{O}_2 \text{ nos fumos} = 35,95 - 23,95 = 12,00$$

$$\text{N}_2 \text{ nos fumos} = 35,95 \cdot \frac{79}{21} + 51,8 = 187,0$$

$$\text{H}_2\text{O nos fumos} = 2 \cdot 1,9 + 14,1 = 17,9$$

PCI do combustível na base 100 kmol de gás

(Dados obtidos da tabela IIIb e convertidos para unidades do SI).

$$\text{CO} = 27 \cdot 282568 = 7629336 \text{ watt.s}$$

$$\text{CH}_4 = 1,9 \cdot 802560 = 1524864 \text{ watt.s}$$

$$\text{H}_2 = 14,1 \cdot 241604 = 3406616 \text{ watt.s}$$

---


$$\text{PCI} = 12560816 \text{ watt.s}$$

Balanço de energia

Estado padrão; água vaporizada e temperatura de referência = 289,16K.

As equações 50 e 52 fornecem

$$\Sigma \Delta H_{1,2} = -\text{PCI} = -12560816 \text{ watt.s}$$

pois

$$\Sigma H_R = 0$$



Calculando  $\Sigma H_P$  a 1366,16K (tabela IIIa)

$$\Sigma H_P = H_{CO_2} + H_{O_2} + H_{N_2} + H_{H_2O} =$$

$$= (33,7.50,62 + 12,0.33,44 + 187,0.31,64 + 17,9.39,04) (1366,16 - 289,16)$$

$$\Sigma H_P = 9394855 \text{ watt.s}$$

O calor transmitido à carga é obtido pela equação 50.

$$Q = \Sigma H_P + \Sigma \Delta H_{18} = 9394855 - 12560816 =$$

$$= -3165961 \text{ watt.s}$$

(o sinal negativo significa que o calor é fornecido dos fumos à carga).

Outras informações podem ser obtidas nas referências |2|, |44| e |63|.

APÊNDICE B - TEMPERATURA ADIABÁTICA DE COMBUSTÃO

Este apêndice mostra como se pode obter a temperatura adiabática de combustão.

Na queima de um combustível ocorre a elevação da temperatura dos produtos da combustão. Se não há perdas caloríficas nem realização de trabalho, a máxima temperatura é atingida na combustão estequiométrica. Essa temperatura é chamada de temperatura adiabática de combustão [59].

A temperatura real de combustão é inferior à temperatura adiabática, devido a perdas para o ambiente e dissociação dos produtos, mesmo na ausência de trabalho.

A temperatura adiabática de combustão é obtida a partir do balanço energético [20].

Para regime permanente (fig.40) o primeiro Princípio da Termodinâmica permite escrever:

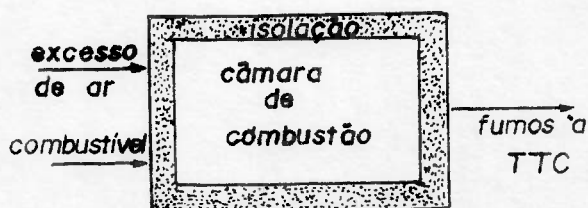


Fig.40 Temperatura adiabática de combustão (TAC).

$$\text{Entalpia dos reagentes} + \text{Energia liberada na reação} = \text{entalpia dos produtos.}$$

$$\begin{aligned}
n_f \Delta H_r + \int_{t_b}^{t_{ar}} m_{ar} c_{par} dt + \int_{t_b}^{t_f} m_{comb} c_{p_{comb}} dt = m_{H_2O} c_{p_{H_2O}} (100 - t_b) + \\
+ m_{H_2O} \Delta H_{V(H_2O)} + \int_{373,16}^{TAC} m_{H_2O} c_{p_{H_2O}} dt + \int_{t_b}^{TAC} m_{CO_2} c_{p_{CO_2}} dt + \int_{t_b}^{TAC} m_{N_2} c_{p_{N_2}} dt + \\
+ \int_{t_b}^{TAC} m_{O_2} c_{p_{O_2}} dt \quad (53)
\end{aligned}$$

onde:

$t_b$  é temperatura de referência (K)

$t_f$  é temperatura de admissão do combustível (K)

$t_{ar}$  é temperatura de admissão do ar de combustão (K)

TAC é temperatura adiabática de combustão (K)

$n_f$  = moles do combustível

$\Delta H_r$  = entalpia de reação (watt.s/mol)

$m_x$  = massa do constituinte  $x$  (kg)

$\Delta H_{V(H_2O)}$  = entalpia de vaporização da água a 373,16K (watt.s/kg)

Se a temperatura de admissão dos reagentes é a temperatura de referência, e se  $\Delta H_r$  inclui água no estado de vapor, a equação (53) se simplifica a

$$n_f \Delta H_r = \sum_i \int_{t_b}^{TAC} m_i c_{p_i} dt \quad (54)$$

onde

$m_i$  = massa do  $i$ -ésimo constituinte do produto (kg)

$c_{p_i}$  = calor específico do  $i$ -ésimo constituinte do produto (watt.s/kg K) à pressão constante.

Se é conhecido o calor específico médio ( $\overline{c_p}$ ) a equação (54) se modifica para:



$$n_f \Delta H_r = \sum_i m_i \bar{c}_{p_i} (T_{AC} - t_b) \quad (55)$$

Devido à variação de  $c_p$  com a temperatura, normalmente usa-se a integração, e o cálculo da temperatura adiabática de combustão conduz a equações de quarto ou de terceiro grau que podem ser resolvidas por tentativa e erro.

Como exposto no apêndice A, a temperatura de referência não é universalmente estabelecida. Vejamos dois exemplos [59], onde a referência é 298,16K

1º Exemplo (onde o calor específico é função da temperatura):

Cálculo da temperatura adiabática de combustão do álcool etílico com 25% de excesso de ar. O álcool e o ar são fornecidos a 298,16K e a água formada está em estado de vapor (fig.41).

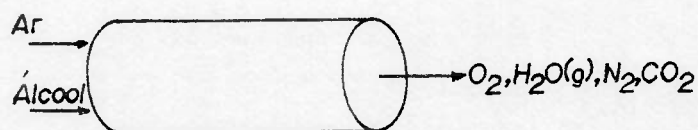
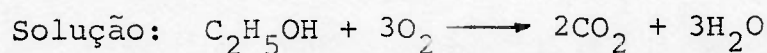


Figura 41 Combustão do álcool etílico



Base : 1 mol de álcool, temperatura de referência 298,16K

$$O_2 \text{ empregado} = 3,0 \cdot 1,25 = 3,75 \text{ moles}$$

$$N_2 \text{ empregado} = 3,75 \cdot \frac{79}{21} = 14,1 \text{ moles}$$

## Composição dos produtos formados

O <sub>2</sub>	0,75 moles
H <sub>2</sub> O	3,00 moles
N <sub>2</sub>	14,10 moles
CO <sub>2</sub>	2,00 moles

A entalpia de formação do álcool etílico (líquido) a 298,16K e  $9,8 \times 10^4$  Pa (latm) de pressão é:

$$\Delta H_R = -1367566 \text{ watt.s/kmol}$$

Esta quantidade de energia deve ser usada para vaporizar 3 moles de água a 298,16K, então, aquecer 3 moles de vapor d'água; 0,75 moles de O<sub>2</sub> e 14,1 moles de N<sub>2</sub> à temperatura final T. Portanto:

$$1367566 = 3.43973 + 2 \int_{298}^T (25,97 + 0,04346T - 1,442 \times 10^{-5}T^2) dT +$$

$$+ 3 \int_{298}^T (30,33 + 0,01246T + 1,183 \times 10^{-6}T^2) dT +$$

$$+ 14,1 \int_{298}^T (27,27 + 0,00523T - 4,18 \times 10^{-9}T^2) dT$$

que integrada, fornece:

$$1233685 = 546,7(T-298) + 0,0995(T^2-298^2) - 9,655 \left[ \left(\frac{T}{100}\right)^3 - (298)^3 \right]$$

Resolvida esta equação resulta a temperatura adiabática de combustão de 1990 K (1717°C)

2º Exemplo (onde é conhecido o calor específico médio)

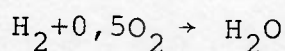
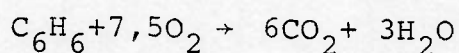
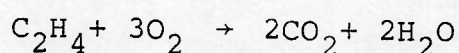
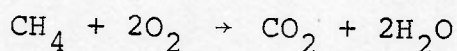
Um gás composto de: 85% de CH<sub>4</sub>; 3% de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>; 3% de C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>  
5% de H<sub>2</sub> e 4% de N<sub>2</sub> é queimado com 20% de excesso de ar. O ar

contém 1,5% de vapor d'água e é pré-aquecido a 873K antes de entrar na câmara de combustão. Calcular a temperatura adiabática de combustão.

Solução:

Base :  $\text{lm}^3$  de gás

As reações de combustão são:



Seja a temperatura de referência 298K. O calor de combustão + calor sensível do combustível + calor sensível do ar =  $m c_p (T_{AC} - t_{base})_{\text{produtos}}$ .

Assim, o calor de combustão é dado por:

$$\text{CH}_4 = 0,85 \cdot 35780^* = 30413$$

$$\text{C}_2\text{H}_4 = 0,03 \cdot 60526 = 1816$$

$$\text{C}_6\text{H}_6 = 0,03 \cdot 139988 = 4199$$

$$\text{H}_2 = 0,05 \cdot 10793 = 540$$

$$\text{total} = 36968 \text{ watt.s}$$

O calor sensível do combustível é expresso por

$$\begin{aligned} \Sigma m_i c_{p_i} (t_{\text{entrada}} - t_{\text{referencia}}) &= \\ = \Sigma m_i c_{p_i} (298 - 298) &= 0 \end{aligned}$$

\*35780 watt.s/m<sup>3</sup> é a entalpia de formação do metano



O calor sensível do ar é

$$(m c_p \Delta T)_{\text{ar}} = m c_p (t_{\text{entr}} - t_{\text{refer}}) = m c_p (t_{\text{entr}} - 298)$$

Para calcular  $m c_p (T_{\text{AC}} - t_{\text{ref}})$  produtos consu  
tam-se literaturas especializadas [50], [59].

componente	$c_p$ (watt.s/m <sup>3</sup> K)
CO <sub>2</sub>	$1,59 + 3,76 \times 10^{-4} t$
H <sub>2</sub> O	$1,50 + 2,09 \times 10^{-4} t$
N <sub>2</sub>	$1,24 + 9,19 \times 10^{-5} t$
O <sub>2</sub>	$1,24 + 9,28 \times 10^{-5} t$

$$O_2 \text{ teórico} = 1,70 + 0,09 + 0,225 + 0,025 = 2,040 \text{ m}^3$$

e o ar seco teoricamente necessário é:

$$2,04 \cdot \frac{100}{21} = 9,72 \text{ m}^3$$

$$\text{o ar total necessário} = 9,72 + 9,72 \cdot \frac{20}{100} = 11,66 \text{ m}^3$$

O ar contém 1,5% de H<sub>2</sub>O e 98,5% de ar seco,  
então:

$$\text{umidade total do ar} = 11,66 \cdot \frac{100}{98,5} = 11,84 \text{ m}^3$$

$$\text{água na umidade do ar} = 11,84 - 11,66 = 0,18 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{calor total disponível} &= 11,66 (1,24 + 9,28 \times 10^{-5} \cdot 873) (873 - 298) + \\ &+ 0,18 \cdot (1,50 + 2,09 \times 10^{-4} \cdot 873) (873 - 298) + 36968 \sim 45980 \text{ watt.s.} \end{aligned}$$

Calculando o volume dos constituintes nos fu  
mos, tem-se:

fumos	volume (m <sup>3</sup> )
CO <sub>2</sub>	1,09
H <sub>2</sub> O	$1,90 + 0,18 = 2,08$
N <sub>2</sub>	$11,66 \cdot 79/100 = 9,21$
O <sub>2</sub>	$1,94 \cdot 21/100 = 0,41$

Portanto

$$45980 = |1,09(1,59+3,76 \times 10^{-4}t) + 2,08(1,50+2,09 \times 10^{-4}t) + \\ + 9,21(1,24+9,19 \times 10^{-5}t) + 0,41(1,24+9,28 \times 10^{-5}t)| \cdot (t-298)$$

$$50981 = 16,267t + 1,729 \times 10^{-3}t^2$$

$$t \cong 2473 \text{ K} .$$

Outras informações sobre este apêndice podem ser obtidas nas referências |2|, |18|, |36|, |44| e |63|.

APÊNDICE C - CONDUTIBILIDADES TÉRMICAS DOS  
REFRATÁRIOS E ISOLANTES

Neste apêndice são apresentadas as variações da condutibilidade térmica em função da temperatura para alguns refratários e isolantes, segundo suas composições químicas.

A massa específica do revestimento ( $\text{lb}/\text{pé}^3$ ) é designada por  $\rho$ . Conservou-se a unidade inglesa porque, infelizmente, ainda é usada pelos fabricantes. Pela mesma razão,  $T$  é expresso em  $^{\circ}\text{C}$ .

Material segundo classificação Tab.VIa e VIb	Equação
1	$K=0,345+0,125891n(T)$
2	$K=0,7092 T^{0,08}$
3	$K=1,1543+10^{-4} T$
4	$K=1,576-8,28 \cdot 10^{-4} T+5,03 \cdot 10^{-7} T^2$
5	$K=2,125-1,368 \cdot 10^{-3} T+6,855 \cdot 10^{-7} T^2$
6	$K=2,674-1,902 \cdot 10^{-3} T+8,665 \cdot 10^{-7} T^2$
8	$K=0,215+0,01986 T^{0,3931}$
9	$K=0,215+0,00017 T$
10	$K=0,250+0,00015 T$
11	$K=0,40714+0,00024 T$
12	$K=6,326 \cdot 10^{-1} -3,591 \cdot 10^{-4} T+2,077 \cdot 10^{-7} T^2$
13	$K=8,47 \cdot 10^{-1} -1,852 \cdot 10^{-4} T+9,792 \cdot 10^{-7} T^2$
IS5	$K=0,0003725(32+1,8 T)^{1,1679}$
IS6	$K=92,657 \cdot 10^{-6} e^{173,9 \cdot 10^{-3} \rho} (32+1,8T)^{1,44-0,035\rho}$

**TABELA IX** Variação da condutibilidade térmica de alguns refratários e isolantes em função da temperatura ( $\text{Kcal}/\text{mh}^{\circ}\text{C}$ )



APÊNDICE D - REGRESSÕES

Muitas das grandezas envolvidas no dimensionamento do revestimento de fornos são apresentadas na forma de gráficos.

Apresentamos, a seguir, como exemplo, a listagem de um dos programas desenvolvidos para substituir um gráfico por uma equação que a represente. No caso trata-se do gráfico da figura 9.

O programa para a execução do método proposto neste trabalho (apêndice H), incorpora os resultados de regressões feitas para figuras como as 6, 7, 8, 9 e 10.

O cálculo é baseado em procedimento estatístico, onde se calcula o coeficiente de correlação múltipla e se efetua a análise de variância. No caso quer-se determinar os coeficientes da expressão:

$$\ln C_c = A + B_1 \ln(PXGRA) + B_2 \ln(PWL) + B_3 |\ln(PXGRA)|^2 + B_4 |\ln(PWL)|^2 + B_5 |\ln(PXGRA) \ln(PWL)|$$

que substitui a família de curvas da figura 9 (fator de correção  $C_{H_2O}$  em função da pressão total do gás).

Maiores informações sobre o procedimento de cálculo podem ser obtidas em |12|, |23|, |43|, |53| e |61|.

A listagem é a seguinte:

```

DIMENSION P,L(49),PXGRA(49),CW(49),XT(49),YT(49),AU(49),Z(6),XY(5-
1,X(5,5),S(5,5),SY(5),LT(5),MT(5),B(5)
K=1
I=K+6
DO 10 J=1,7
  READ(2,100) PWL(J)
  READ(2,100) (PXGRA(IA),CW(IA),IA=K,I)
100 FORMAT(14F5.2)
  DO 20 IB=K,I
    XT(IB)=ALOG(PWL(J))
    YT(IB)=ALOG(PXGRA(IB))
  20 ZT(IB)=ALOG(CW(IB))
  K=K+7
  I=K+6
10 CONTINUE
  DO 38 IB=1,5
  DO 39 IC=1,5
  X(IB,IC)=0.
39 CONTINUE
  XY(IB)=0.
38 Z(IB)=0.
  Z(6)=0.
  YY=0.
  IL=49

```

```

DO 40 ID=1,IL
Z(1)=Z(1)+XT(ID)
Z(2)=Z(2)+YT(ID)
Z(6)=Z(6)+ZT(ID)
X(1,1)=X(1,1)+XT(ID)**2
X(1,2)=X(1,2)+XT(ID)*YT(ID)
X(1,3)=X(1,3)+XT(ID)**3
X(1,4)=X(1,4)+XT(ID)*YT(ID)**2
X(1,5)=X(1,5)+XT(ID)**2*YT(ID)
X(2,2)=X(2,2)+YT(ID)**2
X(2,4)=X(2,4)+YT(ID)**3
X(3,3)=X(3,3)+XT(ID)**4
X(3,4)=X(3,4)+XT(ID)**2*YT(ID)**2
X(3,5)=X(3,5)+XT(ID)**3*YT(ID)
X(4,4)=X(4,4)+YT(ID)**4
X(4,5)=X(4,5)+YT(ID)**3*XT(ID)
XY(1)=Y(1)+XT(ID)*ZT(ID)
XY(2)=XY(2)+YT(ID)*ZT(ID)
XY(3)=XY(3)+XT(ID)**2*ZT(ID)
XY(4)=XY(4)+YT(ID)**2*ZT(ID)
XY(5)=XY(5)+XT(ID)*YT(ID)*ZT(ID)
40 YY=YY+ZT(ID)**2
X(2,3)=X(1,5)
X(2,5)=X(1,4)
X(5,5)=X(3,4)
Z(3)=X(1,1)
Z(4)=X(2,2)
Z(5)=X(1,2)
DO 41 IF=1,5
DO 42 IF=IE,5
S(IE,IF)=X(IE,IF)-Z(IE)*Z(IF)/IL
S(IF,IE)=S(IE,IF)
42 CONTINUE
SY(IF)=XY(IF)-Z(IE)*Z(6)/IL
41 CONTINUE
SYY=YY-Z(6)**2/IL
CALL ARRAY(2,5,5,5,5,S,S)
CALL MINV(S,5,D,LT,MT)
CALL GMPRC(S,SY,8,5,5,1)
RS=0
DO 43 IF=1,5
RS=RS+R(IF)*Z(IF)
43 CONTINUE
A=(Z(6)-RS)/IL
R=0.
DO 44 IG=1,5
44 R=R+R(IG)*SY(IG)
WRITE(3,1138)(XT(IW),YT(IW),ZT(IW),IW=1,IL)
1138 FORMAT(3X,3E20.7)
WRITE(3,110) A,(R(IH),IH=1,5)
110 FORMAT(//,9X,'A',13X,'B1',14X,'B2',14X,'B3',14X,'B4',13X,'B5',/,6E
115.7)
F=(IL-6)*R/(5*(SYY-R))
WRITE(3,115) F,R,SYY
115 FORMAT(//,10X,'F',14X,'R',12X,'SYY',/,3E15.7)
19 CONTINUE
3000 CONTINUE
CALL EXIT
END

```

-0.4605170E 01	-0.3912022E 01	-0.1897120E 01
-0.4605170E 01	-0.1386294E 01	-0.1609437E 01
-0.4605170E 01	-0.6931471E 00	-0.1309333E 01
-0.4605170E 01	0.0000000E 00	-0.1049822E 01
-0.4605170E 01	0.9162907E 00	-0.8439701E 00
-0.4605170E 01	0.1609437E 01	-0.6348782E 00
-0.4605170E 01	0.2302585E 01	-0.5108257E 00
-0.1609437E 01	-0.3912022E 01	-0.7339692E 00
-0.1609437E 01	-0.1386294E 01	-0.5978369E 00
-0.1609437E 01	-0.6931471E 00	-0.5108257E 00
-0.1609437E 01	0.0000000E 00	-0.4307829E 00
-0.1609437E 01	0.9162907E 00	-0.3856625E 00
-0.1609437E 01	0.1609437E 01	-0.3147109E 00



-0.1609437E 01	0.2302585E 01	-0.2484614E 00
-0.9162907E 00	-0.3912022E 01	-0.1625190E 00
-0.9162907E 00	-0.1386294E 01	-0.1508230E 00
-0.9162907E 00	-0.6931471E 00	-0.1392622E 00
-0.9162907E 00	0.9000000E 00	-0.1052605E 00
-0.9162907E 00	0.9162907E 00	-0.9431071E-01
-0.9162907E 00	0.1609437E 01	-0.1278233E 00
-0.9162907E 00	0.2302585E 01	-0.1053605E 00
-0.5108257E 00	-0.3912022E 01	0.1397618E 00
-0.5108257E 00	-0.1386294E 01	0.1210201E 00
-0.5108257E 00	-0.6931471E 00	0.1222175E 00
-0.5108257E 00	0.9000000E 00	0.9531012E-01
-0.5108257E 00	0.9162907E 00	0.7596098E-01
-0.5108257E 00	0.1609437E 01	0.6765860E-01
-0.5108257E 00	0.2302585E 01	0.5626385E-01
-0.2231436E 00	-0.3912022E 01	0.3364721E 00
-0.2231436E 00	-0.1386294E 01	0.3074846E 00
-0.2231436E 00	-0.6931471E 00	0.2623642E 00
-0.2231436E 00	0.9000000E 00	0.2390169E 00
-0.2231436E 00	0.9162907E 00	0.2070139E 00
-0.2231436E 00	0.1609437E 01	0.1823214E 00
-0.2231436E 00	0.2302585E 01	0.1484198E 00
0.0000000E 00	-0.3912022E 01	0.4252676E 00
0.0000000E 00	-0.1386294E 01	0.4252676E 00
0.0000000E 00	-0.6931471E 00	0.3715633E 00
0.0000000E 00	0.9000000E 00	0.3364721E 00
0.0000000E 00	0.9162907E 00	0.2623642E 00
0.0000000E 00	0.1609437E 01	0.2231436E 00
0.0000000E 00	0.2302585E 01	0.1823214E 00
0.1823214E 00	-0.3912022E 01	0.5306280E 00
0.1823214E 00	-0.1386294E 01	0.5128234E 00
0.1823214E 00	-0.6931471E 00	0.4700034E 00
0.1823214E 00	0.9000000E 00	0.3715633E 00
0.1823214E 00	0.9162907E 00	0.3364721E 00
0.1823214E 00	0.1609437E 01	0.2623642E 00
0.1823214E 00	0.2302585E 01	0.2070139E 00

A	B1	B2	B3	B4	B5
0.3200709E 00	0.5354601E 00	-0.4309832E-01	0.5011882E-01	-0.6311134E-03	-0.6339703E-01
F	R	SYX			
0.8189002E 03	0.1395801E 02	0.1410459E 02			

No caso, o resultado do processamento foi a obtenção dos coeficientes:

A = 0,320070  
 B1 = 0,535460  
 B2 = -0,043098  
 B3 = 0,050118  
 B4 = -0,000631  
 B5 = -0,063397

A equação que representa o gráfico da figura 9 fica:  $\ln C_c = 0,32 + 0,5354 \ln(PXGRA) - 0,0431 \ln(PWL) + 0,05012 |\ln(PXGRA)|^2 + - 0,000631 |\ln(PWL)|^2 - 0,063397 |\ln(PXGRA)| |\ln(PWL)|$  podendo-se, assim, calcular  $\ln C_c$  para cada par de valores PWL e  $P_{total}$ , pois,  $PXGRA = \frac{1}{2}(PWL + P_{total})$ .



APÊNDICE E - PREÇOS DE REFRAATÁRIOS E COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS

O levantamento dos preços que se apresenta a seguir foi feito em setembro de 1979.

A mão de obra qualificada para assentamento de tijolos refratários ou isolantes é de Cr\$10.000,00/m<sup>3</sup>. Em média, cada homem assenta 1m<sup>3</sup> de tijolos refratários por dia.

O custo dos combustíveis é

Cr\$ 2,40/kg BPF

Cr\$ 3,10/kg BTE

Cr\$ 2,40/kg APF

Segue-se tabela de preços de alguns refratários em função do formato e dimensão do material.

Preços (baseados nas tabelas V, VIa e VIb)

Grupo	Tipo									
	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11
I	12,94	17,92	22,74	46,98	105,40	135,11	20,32	17,94	20,10	23,68
II	15,12	20,86	25,08	54,58	122,47	157,09	24,10	20,73	23,47	27,46
III	16,79	23,41	28,86	60,77	136,40	166,21	29,63	25,52	28,43	30,60
IV	19,00	26,33	33,42	69,22	155,10	192,83	33,85	29,69	34,10	34,76
VI	26,89	36,74	46,57	97,48	218,66	280,37	24,10	20,76	23,47	27,46
VII	25,92	35,85	45,36	94,07	210,84	270,34				
VIII	31,27	36,74	46,57	97,48	218,66	280,37				
X	46,22	64,00	81,23	170,39	375,24	481,15				
XII	32,41	45,03	57,06	177,49	263,52	337,19				
XIII	37,60	52,10	66,10	136,15	305,46	391,68				
XIV	62,19	85,26	109,47	225,30	505,50	648,16				
XV	32,81	45,50	57,69	118,86	266,71	341,88				
XVI	43,99	60,82	77,21	159,00	384,44	457,21				
XVII	68,84	95,50	121,20	256,62	434,66	717,74				

Obs: Os preços listados são em cr\$/peça de material considerado.

**TABELA X Preços de alguns refratários e isolantes**

O preço dos isolantes, cuja regressão da condutibilidade térmica foi apresentada no apêndice C, é:

material IS-5 .....	Cr\$ 1.035,00/m <sup>2</sup>	(1" de espessura)
material IS-6 {	8lb/pē <sup>3</sup> .....	Cr\$ 690,00/m <sup>2</sup> (1" de espessura)
	6lb/pē <sup>3</sup> .....	Cr\$ 520,00/m <sup>2</sup> (1" de espessura)
	4lb/pē <sup>3</sup> .....	Cr\$ 350,00/m <sup>2</sup> (1" de espessura)

Os preços mencionados neste apêndice são fornecidos (atualizados) como dados de entrada em cada problema.



APÊNDICE F - FATOR DE FORMA

São apresentados um esquema (fig.42) e as fórmulas correspondentes que permitem determinar o fator de forma, na transmissão de calor por radiação, em associações típicas de revestimento de fornos. Apresentam-se, ainda, os gráficos correspondentes (figs. 43, 44 e 45) como veículo de obtenção do fator de forma sem o emprego das fórmulas.

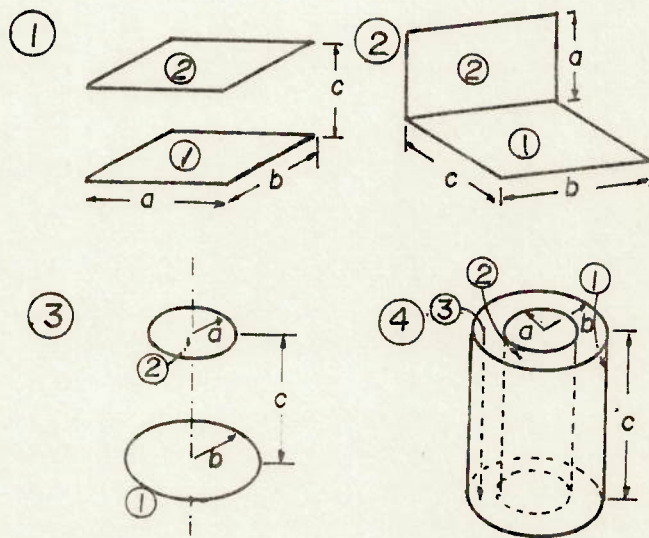


Fig.42-Representação esquemática para determinação do fator de forma (fórmulas que se seguem).

Maiores informações podem ser obtidas em |25|, |35|, |40|, |45|, |48|, |56| e |62|.



Configuração 1: X=a/c; Y=b/c

$$F_{A_1-A_2} \left( \frac{\pi XV}{2} \right) = \ln \left[ \frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2} \right]^{1/2} + Y\sqrt{1+X^2} \operatorname{arctg} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + X\sqrt{1+Y^2} \operatorname{arctg} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} - Y \operatorname{arctg} Y - X \operatorname{arctg} X$$

Configuração 2: X=a/b; Y=c/b; Z=X<sup>2</sup>+Y<sup>2</sup>

$$F_{A_1-A_2}(\pi Y) = \frac{1}{4} \left\{ \ln \left[ \frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+Z} \right] + Y^2 \ln \left[ \frac{Y^2(1+Z)}{(1+Y^2)Z} \right] + X^2 \ln \left[ \frac{X^2(1+Z)}{Z(1+X^2)} \right] \right\} + Y \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{Y} \right) + X \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{X} \right) - \sqrt{Z} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{\sqrt{Z}} \right)$$

Configuração 3: X=a/c; Y=c/b; Z=1+(1+X<sup>2</sup>)Y<sup>2</sup>

$$F_{A_1-A_2} = \frac{1}{2} \left( Z - \sqrt{Z^2 - 4X^2Y^2} \right)$$

Configuração 4: X=b/a; Y=c/a; A=X<sup>2</sup>+Y<sup>2</sup>-1; B=Y<sup>2</sup>-X<sup>2</sup>+1

$$F_{A_1-A_2} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left\{ \arccos \left( \frac{B}{A} \right) - \frac{1}{2Y} \left[ \sqrt{(A+2)^2 - (2X)^2} \arccos \left( \frac{B}{XA} \right) + \operatorname{Barcsen} \left( \frac{1}{X} \right) - \frac{\pi A}{2} \right] \right\}$$

$$F_{A_1-A_1} = 1 - \frac{1}{X} + \frac{2}{\pi X} \operatorname{arctg} \left( \frac{2\sqrt{X^2-1}}{Y} \right) - \frac{Y}{2\pi X} \left\{ \sqrt{\frac{X^2+Y^2}{Y}} \operatorname{arcsen} \left[ \frac{4X^2(X^2-1)+Y^2(X^2-2)}{X^2Y^2+4X^2(X^2-1)} \right] - \arcsen \left( \frac{X^2-2}{X} \right) + \frac{\pi}{2} \left( \sqrt{\frac{4X^2+Y^2}{Y}} - 1 \right) \right\}$$

$$F_{A_1-A_3} = 0,5(1 - F_{A_1-A_2} - F_{A_1-A_1})$$

**TABELA XI** Fórmulas para o cálculo do fator de forma das situações apresentadas na Fig. 42.





APÊNDICE G - RAIOS CRÍTICOS

Para paredes cilíndricas, o fluxo de calor conduzido através da parede é inversamente proporcional ao raio externo do cilindro, e o fluxo de calor trocado com o meio externo é diretamente proporcional a esse raio. Uma figura típica para o fluxo de calor para o raio externo é a seguinte:

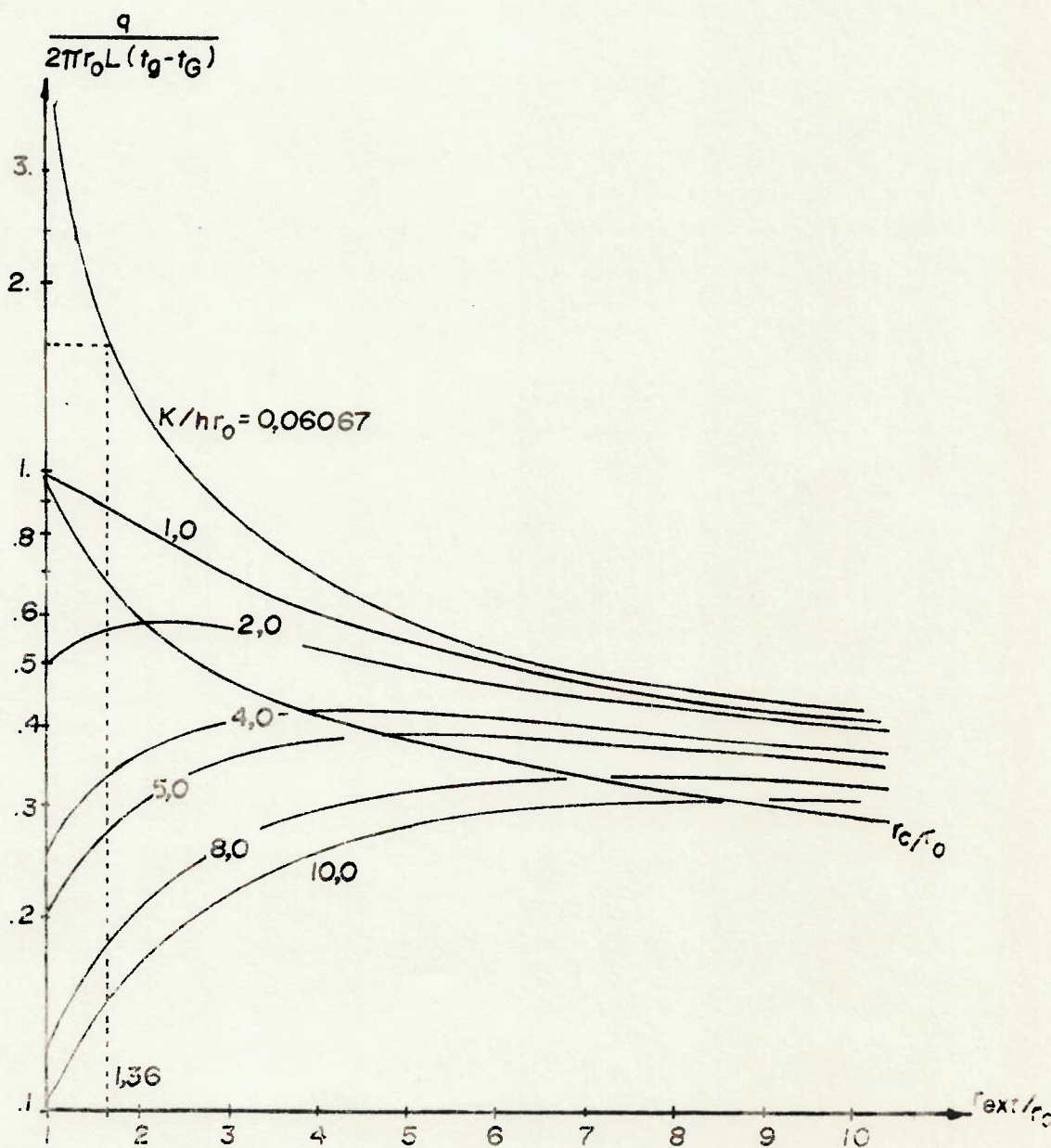


Figura 46 Efeito da relação de raios sobre a transmissão de calor através de paredes cilíndricas simples



Nessa figura,  $r_c$ , ao qual corresponde o máximo fluxo, é chamado de raio crítico, sendo definido por:

$$r_c = \frac{K}{h_{ext}}$$

onde:  $r_c$  é o raio externo do cilindro, para o qual o fluxo de calor conduzido através da parede é máximo.

$K$  é a condutibilidade térmica da camada externa de revestimento.

$h_{ext}$  é o coeficiente de película para a face externa.

Para o terceiro exemplo do capítulo VIII tem-se, para o revestimento código 9, segundo a tabela IX.

$$K = 0,215 + 0,00017T.$$

Avaliando a condutibilidade térmica do referido revestimento à temperatura média de parede, obtém-se

$$K = 0,299 \text{ watt/mK}$$

A equação (47) fornece o coeficiente de película  $h_{ext} = 4,944 \text{ watt/m}^2\text{K}$ .

$$\text{Portanto } r_c = \frac{0,299}{4,944} = 0,06067\text{m}.$$

Na figura 46 tem-se indicado a relação 1,32 do raio externo do forno ( $r_1 = 0,66\text{m}$ ) sobre o raio interno do forno já revestido ( $r_0 = 0,50\text{m}$ ).

No caso em exame, o raio interno é maior que o raio crítico e, portanto o fluxo térmico através das paredes é menor que o fluxo que corresponderia ao raio crítico.

Deve-se notar que se o raio interno é menor que o raio crítico, nem sempre o acréscimo de camadas de material reduzem o fluxo de calor.

APÊNDICE HCONVERSÃO PARA O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

$$h = 1,24 \Delta T^{1/3} \quad (47)$$

Onde h em watt/m<sup>2</sup>K

$\Delta T$ (K)

Fatores de conversão:

$$1 \text{ Kgf} = 9,8 \text{ N}$$

$$1 \text{ atm} = 1,0132 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Kcal} = 4186,40 \text{ Ws}$$

$$1 \text{ Kcal/h} = 1,1628 \text{ W}$$

$$1 \text{ lb/ft}^3 = 16,019 \text{ Kg/m}^3$$

APÊNDICE I - LISTAGEM DO PROGRAMA

```

REAL LARG
DIMENSION ESP(5),E(5),EOT(5),TEMP(5),NTJES(5),NTESO(5),NTIJ(5),NTI
1JO(5),CRCAM(5),CR(5),TMOT(6),COST(3),GUAR(5)
COMMON TCRIT(14),RO,PTOTA,PORC,TGAS,EMIMA,EISO,TMAT,KFORM,HALT,PRO
1F,LARG,RAIO,T(6),PCO2,PH2O,PCCO,TAR,EMIEX,NCAM,ISO(5),XIS(5),YPIS(
25),TO,CRCOM,TADM,V,DINT,VAR
LEI=5
IMP=6
C KPRR E A QUANTIDADE DE PROBLEMAS A RESOLVER
READ(5,37) KPRR
37 FORMAT(I4)
DO 2000 LALA=1,KPRR
WRITE(IMP,1008)LALA
1008 FORMAT('1'/61X,'CALCULO DE UM FORNO'//65X,'PROBLEMA',I4/31X,'DADOS
1')
ADD=0.
CFULL=0.
READ(LEI,10)TAR,VAR,EMIMA,DELT,KCOMB,CRCOM,TADM,ECEXO,ETA
10 FORMAT(F6.2,F4.1,F5.2,F8.2,A3,F6.2,2F7.2,F5.2)
READ(LEI,3)KFORM,PORC
3 FORMAT(I1,F6.2)
IF(KFORM=0)5,6,5
5 READ(LEI,20)HALT,PROF,LARG
20 FORMAT(3F7.3)
GO TO 501
6 READ(LEI,20)HALT,DINT
RAIO=DINT/2.
501 CONTINUE
READ(LEI,1012)HORAS,NDIAS,MESES,NPERI
1012 FORMAT(F4.1,1X,3I2)
WRITE(IMP,2005)HORAS,NDIAS,MESES,NPERI
2005 FORMAT(1X/35X,'TEMPO DE OPERACAO'/40X,'HORAS ',25('.')) ,I17/40X,'
1DIAS ',25('.')) ,I17/40X,'MESES ',25('.')) ,I17/40X,'ANOS ',25('
2.'),I17)
READ(LEI,15) PTOTA,EISO,EMIEX,TO
15 FORMAT(F9.1,2F5.2,F7.2)
TADM=TADM-273.16
ECEXO=ECEXO/100.
PTOTA=PTOTA/9.8E+04
ETA=ETA/100.
CALL ENERG(KCOMB,TADM,ECEXO,PTOTA,ETA,PCO2,PH2O,PCCO,TGAS)
TMAT=DELT-273.16
TROD=TMAT+273.16
WRITE(IMP,2001) TAR,VAR,EMIMA,TROD
2001 FORMAT(1X/35X,'CONDICOES AMBIENTES'/40X,'TEMPERATURA DO AR (K)',1X
1,9('.')) ,F17.2/40X,'VELOCIDADE DO AR (M/S)',1X,8('.')) ,F17.2//
235X,'CARGA'/40X,'EMISSIVIDADE ',18('.')) ,F17.2/40X,'TEMPERATURA DE
3 AQUFCIMENTO (K) ', F17.2)
TAR=TAR-273.16
TADM=TADM+273.16
ECEXO=ECEXO*100.
ETA=ETA*100.
WRITE(IMP,2002)KCOMB,CRCOM,TADM,ECEXO,ETA
2002 FORMAT(1X/35X,'COMBUSTAO'/40X,'TIPO DE COMBUSTIVEL',1X,11('.')) ,i
24X,A4/40X,'CUSTO DO COMBUSTIVEL (CRS/KG) ', F17.2/40X,'TEM
3PERATURA DE ADMISSAO (K) ',3('.')) ,F17.2/40X,'EXCESSO DE AR ((
4',12('.')) ,F17.2/40X,'EFICIENCIA',5X,'(( ) ',12('.')) ,F17.2)
TADM=TADM-273.16
ECEXO=ECEXO/100.
ETA=ETA/100.
IF(KFORM) 8113,8112,8113
8113 CONTINUE
WRITE(IMP,2003)PORC,HALT,PROF,LARG
2003 FORMAT(1X/35X,'FORNO'/40X,'FORMATO ',23('.')) ,' PARALELEPIPEDICO'
1/40X,'PORCENTAGEM OCUPADA DO VOLUME (( ) ', F14.2/40X,'ALTU
2RA',6X,'(M)',1X,15('.')) ,F17.2/40X,'COMPRIMENTO (M) ',15('.')) ,F
317.2/40X,'LARGURA',5X,'(M) ',15('.')) ,F17.2)
8112 CONTINUE

```



```

WRITE(IMP,2004)PORC,HALT,DINT
GO TO 8114
2004 FORMAT(1X/35X,'FORNO'/40X,'FORMATO ',23('.'),7X,'CILINDRICO'/40X,
1'PORCENTAGEM OCUPADA DO VOLUME (('),F14.2/40X,'ALTURA',6
2X,'(M)',1X,15('.'),F17.2/40X,'DIAMETRO (M)',1X,15('.'),F17.2)
8114 CONTINUE
PORC=PORC/100.
CALL RADIA
TIME=HORAS*DIAS*MESES*NPERI
PTOTA=PTOTA*9.8E+04
WRITE(IMP,2006)PTOTA,EISO,EMIEX,TO
2006 FORMAT(1X/35X,'RADIACAO'/40X,'PRESSAO INTERNA DO FORNO (PA) ',1('
1.'),F16.2/40X,'EMISSIVIDADE FACE INTERNA ',6('.'),F16.2/39X,'
2EMISSIVIDADE FACE EXTERNA ',6('.'),F16.2/40X,'TEMPERATURA MAX.
3FACE EXTERNA(K) ',F15.2)
PTO A=PTOTA/9.8E+04
TO=TO-273.16
REAL(LEI,16) NCAM,RO
16 FORMAT(I2,F6.1)
C RO E A DENSIDADE DA MANTA, EXPRESSA EM LBM/FT**3
READ(LEI,31)(ISO(I),I=1,NCAM)
31 FORMAT(5A4)
WRITE(IMP,2087)NCAM,(ISO(IT),IT=1,NCAM)
2087 FORMAT(1X/35X,'REVESTIMENTO'/40X,'NUMERO DE CAMADAS ',13('.'),I
28,/40X,'MATERIAIS (CODIGOS) ',11('.'),2X,5(A8,1X))
READ(LEI,1)(CR(IA),IA=1,NCAM)
1 FORMAT(5F7.2)
READ(LEI,1000)(XIS(N),N=1,NCAM)
1000 FORMAT(5F6.4)
WRITE(IMP,2008)(CR(IT),IT=1,NCAM)
2008 FORMAT(40X,'PRECO (CR$/ELEMENTO) ',10('.'),5(F8.2,1X))
WRITE(IMP,2009)(XIS(IT),IT=1,NCAM)
2009 FORMAT(40X,'COMPRIMENTO (M) ',15('.'),5(F8.2,1X))
READ(LEI,1000)(YPIS(IT),IT=1,NCAM)
WRITE(IMP,2010)(YPIS(IT),IT=1,NCAM)
2010 FORMAT(40X,'ALTURA (M) ',20('.'),5(F8.2,1X))
READ(LEI,1000)(ESP(IT),IT=1,NCAM)
WRITE(IMP,2011)(ESP(IT),IT=1,NCAM)
2011 FORMAT(40X,'ESPESSURA (M) ',17('.'),5(F8.2,1X))
WRITE(IMP,2012)
2012 FORMAT('1'/31X,'SOLUCOES')
READ(LEI,1010)(TCRIT(KK),KK=1,14)
1010 FORMAT(10F6.1)
7 IF(KFORM).50,40,50
40 DO 60 L1=1,NCAM
GUAR(L1)=ESP(L1)
60 ESP(L1)=.10
LIMIT=2
IREP=1
80 TINT=T(IREP)
Y=HALT
DINT=2*RAIO
X=3.141519*DINT
CRMIN=9.9E14
GO TO 90
50 LIMIT=3
DO 100 IREP=1,LIMIT
711 CRMIN=9.9E14
TINT=T(IREP)
712 IF(IREP=2) 130,140,150
130 X=PROF
Y=HALT
GO TO 160
140 X=LARG
Y=HALT
GO TO 90
150 X=PROF
Y=LARG
GO TO 90
160 CONTINUE
90 B=(TINT-TO)/((TO-TAR)*(1.069*(TO-TAR)**(1./3)+4.88E-08*EMIEX*(TO+T
1AR+2*273.))**2+(TAR+273.))**2))
Q=X*Y*(TINT-TO)/B
NUM=0
L=1
J=0

```

```

L1=10
DO 200 I=1,NCAM
200 E(I)=0.
360 IF(NUM) 210,220,210
210 K=IFIX(ALOG(NUM*1.)/ALOG(10.)+.002)+2
    IF(K-NCAM=1) 230,240,240
230 TEMP(K+1)=TO
    TEMP(K)=T(IREP)
    DO 250 M1=2,K
        M=K-M1+2
        KONTR=IFIX((FLOAT(NUM)/(10**(M-1))-NUM/(10**(M-1)))*10+.05)
        E(M)=KONTR*ESP(M)
        TEMP(M)=T(IREP)
        R1=TEMP(M+1)
270 A=TEMP(M)
    LL1=ISO(M)
    CALL COTIR(LL1,A,R1,C)
    TR=E(M)*(T(IREP)-TO)/(B*C)+TEMP(M+1)
    TEMP(M)=(TEMP(M)+TR)/2.
    IF(ABS(TR-TEMP(M))/TEMP(M)-.01) 260,270,270
260 CALL TLIM(LL1,TALT)
    IF(TEMP(M)-TALT) 250,250,280
250 CONTINUE
    GO TO 290
220 TEMP(2)=TO
    TEMP(1)=T(IREP)
290 LL1=ISO(1)
    A=T(IREP)
    R1=TEMP(2)
    CALL COTIR(LL1,A,R1,C)
    E(1)=(T(IREP)-TEMP(2))*R*C/(T(IREP)-TO)
    CRISO=0.
    IF(E(1)) 300,310,310
310 DO 320 I=1,NCAM
    NTJES(I)=IFIX(E(I)/ESP(I)+.5)
    NTIJ(I)=IFIX(X*Y/(XIS(I)*YPIS(I))+.9)*NTJES(I)
    CRCAM(I)=CR(I)*NTIJ(I)
320 CRISO=CRISO+CRCAM(I)
    E(1)=NTJES(1)*ESP(1)
    CRNOV=CRISO+Q*CRCOM/PCCO*HORAS*MESES*NPERI*NDIAS
    IF(CRNOV-CRMIN) 330,340,340
330 DO 350 I=1,NCAM
    CRMIN=CRNOV
    EOT(I)=E(I)
    NTESO(I)=NTJES(I)
    TMOT(I)=TEMP(I)
350 NTIJO(I)=NTIJ(I)
    TMOT(I)=TO
340 NUM=NUM+1
    GO TO 360
300 J=J+1
    NUM=J*L1
    L=L1
    GO TO 360
280 J=NUM/10+1
    NUM=J*L1
    L=L1
    GO TO 360
240 IF(KFORM) 390,400,390
400 ACUM=0
    DO 410 I=1,NCAM
410 ACUM=ACUM+2*EOT(I)
    Y1=1
440 W=DINT*EXP(ACUM/Y1)
    IF(ABS((W-Y1)/Y1)-.01) 420,430,430
430 Y1=(W+Y1)/2
    GO TO 440
420 W=(Y1+W)/2
    DEXT=DINT
    DO 427 LIS=1,NCAM
427 ESP(LIS)=GUAR(LIS)
    DO 450 N=1,NCAM

```



```

E(N)=.5*DEXT*(EXP(2*EOT(N)/W)-1.)
NTESO(N)=IFIX(F(N)/ESP(N)+.9)
NTIJO(N)=IFIX(NTESO(N)*X*Y/(XIS(N)*YPIS(N))+.9)
EOT(N)=ESP(N)*NTESO(N)
E(N)=W/2*ALOG((DEXT+2*EOT(N))/DEXT)
450 DEXT=DEXT+2*EOT(N)
X=X/3.141519
GO TO 520
390 CONTINUE
520 CRMIN=0.
DO 590 II=1,NCAM
CRCAM(II)=NTIJO(II)*CR(II)
590 CRMIN=CRMIN+CRCAM(II)
391 CONTINUE
READ(LEI,2)V
2 FORMAT(F4,2)
C V E UM FATOR QUE DA A POSICAO DA PAREDE, ISTO E, SE A PAREDE FOR VERTI-
C CAL VALE 1,39 , SE A PAREDE FOR HORIZONTAL V=1,79
CALL FLUTE(TINT,EOT,TMOT,QCOND)
WRITE(IMP,8121)
8121 FORMAT( /,3X,56('*'))
631 GO TO (564,601,602,603,604),NCAM
604 WRITE(IMP,599)
599 FORMAT('+',92X,12('*'))
603 WRITE(IMP,597)
597 FORMAT('+',80X,12('*'))
602 WRITE(IMP,596)
596 FORMAT('+',68X,12('*'))
601 WRITE(IMP,595)
595 FORMAT('+',56X,12('*'))
564 CONTINUE
TINT=TINT+273.16
QCOND=QCOND*X*Y
WRITE(IMP,600)IREP,TINT,QCOND
600 FORMAT(5X,'SOLUCAO NA FACE',I2/8X,'TEMPERATURA INTERNA (K) ',10('.',
1) ',F10.2/8X,'FLUXO TERMICO (WATTS) ',10('.',1),F10.2/ )
TINT=TINT-273.16
LL1=ISO(1)
CALL TLIN(LL1,TALT)
IF(TMOT(1)-TALT) 1147,1147,1038
1038 WRITE(IMP,1039)
1039 FORMAT(/24X,'A FACE NAO PODE SER CONSTRUIDO'/29X,'COM O MATERIAL
1 ESPECIFICADO'/3X,78('*'))
GO TO 1036
1147 CONTINUE
WRITE(IMP,615) (ISO(N),N=1,NCAM)
615 FORMAT(6X,'REVESTIMENTO CODIGO',20X,5(A10,2X))
DO 2007 I=1,NCAM
2007 TMOT(I)=TMOT(I)+273.16
TMOT(I)=TMOT(I)+273.16
WRITE(IMP,625) (TMOT(N),N=1,NCAM)
625 FORMAT(10X,'TEMPERATURA FACE INTERNA (K) ',5('.',1) ',5(F10.2,2X))
WRITE(IMP,626) (TMOT(N+1),N=1,NCAM)
626 FORMAT(10X,'TEMPERATURA FACE EXTERNA (K) ',5('.',1) ',5(F10.2,2X))
WRITE(IMP,627) (NTESO(N),N=1,NCAM)
627 FORMAT(10X,'TOTAL DE CAMADAS ',18('.',1) ',5(I10,2X))
WRITE(IMP,628) (NTIJO(N),N=1,NCAM)
628 FORMAT(10X,'ELEMENTOS NECESSARIOS ',13('.',1) ',5(I10,2X))
WRITE(IMP,629) (EOT(N),N=1,NCAM)
629 FORMAT(10X,'ESPESURA DE REVESTIMENTO (M) ',5('.',1) ',5(F10.2,2X))
WRITE(IMP,639) (CRCAM(N),N=1,NCAM)
639 FORMAT(10X,'CUSTO',20X,'(CRS) ....' ',5(F10.2,2X))
WRITE(IMP,634)
634 FORMAT(3X,56('*'))
GO TO (671,672,673,674,675),NCAM
675 WRITE(IMP,599)
674 WRITE(IMP,597)
673 WRITE(IMP,596)
672 WRITE(IMP,595)
671 COST(IREP)=CRMIN
IF(LIMIT.EQ.2.AND.IREP.EQ.1) COST(IREP)=COST(IREP)*.5
IF(LIMIT.EQ.2.AND.IREP.EQ.1) ADD=ADD*.5
ADD=ADD+QCOND*2.
DO 4007 IZ=1,NCAM

```



```

4007 TMOT(IZ)=TMOT(IZ)-273.16
      TMOT(IZ)=TMOT(IZ)-273.16
      CFULL=CFULL+2*COST(IREP)
635  LL1=ISO(1)
1036 IF(KFORM=2) 1037, 780,1037
1037 IF(KFORM=0) 100,620,100
620  IF(IREP=LIMIT) 630,780,780
630  IREP=2
      X=3.141519*DINT/2
      Y=DINT/2
      TINT=T(IREP)
      CRMIN=9.9E14
      LILO=2
      KFORM=2
      GO TO 90

100  CONTINUE
      LILO=IREP-1
780  CONTINUE
      LL1=ISO(1)
      CALL TLIM(LL1,TALT)
      IF(TMOT(1)-TALT)8117,8117,8119
8117 CONTINUE
      WRITE(IMP,677)TIME,(N,COST(N),N=1,LILO)
677  FORMAT(//,3X,78('*'))/5X,'CUSTO DO REVESTIMENTO (CRS) (PARA UMA VID
1A DE ',F11.0,'(HOR)'/9X,'FACE',I2,' (CRS) ',25('.'),F1
21.2))
      WRITE(IMP,678)CFULL
678  FORMAT(//9X,'TOTAL (CRS) ',25('.'),F11.2/3X,78('*'))
      TGAS=TGAS+273.16
      WRITE(IMP,7077) TGAS
7077 FORMAT(15X,'BALANCO TERMICO'/20X,'TEMPERATURA ADIABATICA DE COMBUS
1TAO',F15.2,1X,'K')
      WRITE(IMP,6661) ADD
6661 FORMAT(20X,'PERDA TOTAL PELAS FACES WATTS ',F15.2)
      TGAS=TGAS-273.16
      GO TO 2000
8119 CONTINUE
2000 CONTINUE
      CALL EXIT
      END
      SURROUTINE RADIA
      REAL LARG
      INTEGER FORMA
      DIMENSION FPAR(18),FPER(27),SS(12,12),SST(12,12),GS(12),DET(6),COF
1AT (12,12),L(12),M(12),W(6),FCIL(10),L1(6),M1(6),PROD(12,12)
2,SZ(6,6),SSZ(6,6),COFAZ(6,6),GZ(6),PROZ(6,6)
      COMMON TCRIT(14),RO,PTOTA,PORC,TGAS,EMIMA,EISO,TMAT,KFORM,HALT,PRO
1F,LARG,RAIO,T(6),PCO2,PH2O,PCCO,TAR,EMIEX,NCAM,ISO(5),XIS(5),YPIS(
25),TO,CRCOM,TADM,V,DINT,VAR
      F1(X,Y)=(ALOG(((1+X**2)*(1+Y**2)/(1+X**2+Y**2)))**0.5)+Y*SQRT(1+X**
12)*ATAN(Y/SQRT(1+X**2))+X*SQRT(1+Y**2)*ATAN(X/SQRT(1+Y**2))-Y*ATAN
2(Y)-X*ATAN(X))*2/(3.141519*X*Y)
      F2(X,Y)=(1/4.*(ALOG((1+X**2)*(1+Y**2)/(1+X**2+Y**2))+Y**2*ALOG(Y**
12*(1+X**2+Y**2)/((1+Y**2)*(X**2+Y**2)))+X**2*ALOG(X**2*(1+X**2+Y**
22)/((X**2+Y**2)*(1+X**2)))))+Y*ATAN(1/Y)+X*ATAN(1/X)-SQRT(X**2+Y**2
3)*ATAN(1/SQRT(X**2+Y**2)))/(3.141519*Y)
      F3(X,Y)=0.5*(1.+(1+X**2)*Y**2-SQRT((1+(1+X**2)*Y**2)**2-4*X**2*Y**
12))
      F4(X,Y)=1/X-1/3.141519*(ATAN(SQRT(1-((Y/X)**2+(1/X)**2-1)/((Y/X)*
1*2-(1/X)**2+1)))**2)/(((Y/X)**2+(1/X)**2-1)/((Y/X)**2-(1/X)**2+1))
2/X-SQRT((Y/X+X/Y+1/(X*Y))**2-(2/Y)**2)*ATAN(SQRT(1-((Y/X)**2+(1/X
3)**2-1)/((Y/X)**2-(1/X)**2+1)*X))**2)/(((Y/X)**2+(1/X)**2-1)/((Y
4/X)**2-(1/X)**2+1)*X))/2+0.5*(Y/X-X/Y+1/(X*Y))*ATAN((1/X)/SQRT(1-
5(1/X)**2))-3.141519/4*(Y/X+X/Y-1/(X*Y))
      F5(X,Y)=1+Y/(4*X)-1/X+(2/3.141519)*(1/X*ATAN(2*SQRT((X/Y)**2-(1/Y)
1**2))+Y/(2*X*3.141519)*ATAN((1-2*(1/X)**2)/SQRT(1-(1-2*(1/X)**2)*
2*2))-(SQRT(4+(Y/X)**2)/(2*3.141519))*(3.141519/2+ATAN((1-(2*1/X**2
3)/(4*(X/Y)**2-4*(1/Y)**2+1))/SQRT(1-(1-(2/X**2)/(4*(X/Y)**2-4*(1/Y
4)**2+1))**2)))
C CALCULO DA MATRIZ DE TRANSFERENCIA
C FORMATO PARALELEPIPEDICO
      FORMA=KFORM
      IF(FORMA=0)15,25,15
15  CONTINUE

```

$X1=2*HALT/((1-PORC)*PROF)$   
 $X2=2*HALT/((1+PORC)*PROF)$   
 $X3=(1-PORC)*HALT/((1+PORC)*PROF)$   
 $X4=2*LARG/((1-PORC)*HALT)$   
 $X5=LARG/HALT$   
 $X6=HALT/PROF$   
 $X7=(1-PORC)*PROF/((1+PORC)*HALT)$   
 $X8=PROF/HALT$   
 $X9=2*HALT/((1-PORC)*LARG)$   
 $X10=HALT/LARG$   
 $X11=(1-PORC)*LARG/((1+PORC)*PROF)$   
 $X12=(1-PORC)*PROF/((1+PORC)*LARG)$   
 $X13=PROF/LARG$   
 $X14=(1-PORC)*LARG/((1+PORC)*HALT)$   
 $X15=(1-PORC)*HALT/((1+PORC)*LARG)$   
 $X16=2.*LARG/(PROF*(1-PORC))$   
 $X17=LARG/PROF$   
 $X18=2*PROF/((1-PORC)*HALT)$   
 $X19=2*PROF/((1+PORC)*HALT)$   
 $X20=(1+PORC)*LARG/((1-PORC)*PROF)$   
 $X22=(1+PORC)*LARG/((1-PORC)*HALT)$   
 $X23=2*PROF/((1-PORC)*LARG)$   
 $X24=2*PROF/((1+PORC)*LARG)$   
 $X25=(1+PORC)*HALT/((1-PORC)*LARG)$   
 $X26=(1+PORC)*PROF/((1-PORC)*HALT)$   
 $X27=(1+PORC)*PROF/((1-PORC)*LARG)$   
 $X28=(1+PORC)*HALT/((1-PORC)*PROF)$   
 $X29=(1-PORC)*HALT/(2*LARG)$   
 $X30=(1-PORC)*LARG/(2*HALT)$   
 $X31=(1-PORC)*LARG/(2*PROF)$   
 $X32=(1-PORC)*PROF/(2*LARG)$   
 $X33=(1-PORC)*PROF/(2*HALT)$   
 $X34=(1-PORC)*HALT/(2*PROF)$   
 $FPAR(1) =F1(X29,X13)$   
 $FPAR(2) =F1(X29,X32)$   
 $FPAR(3) =F1(X10,X32)$   
 $FPAR(4) =F1(X25,X27)$   
 $FPAR(5) =F1(X25,X13)$   
 $FPAR(6) =F1(X10,X27)$   
 $FPAR(7) =F1(X10,X13)$   
 $FPAR(8) =F1(X30,X8)$   
 $FPAR(9) =F1(X30,X33)$   
 $FPAR(10)=F1(X22,X26)$   
 $FPAR(11)=F1(X22,X8)$   
 $FPAR(12)=F1(X17,X34)$   
 $FPAR(13)=F1(X31,X6)$   
 $FPAR(14)=F1(X31,X34)$   
 $FPAR(15)=F1(X20,X28)$   
 $FPAR(16)=F1(X20,X6)$   
 $FPAR(17)=F1(X17,X28)$   
 $FPAR(18)=F1(X17,X6)$   
 $FPER(1) =F2(X1 ,X16)$   
 $FPER( 2)=F2(X2 ,X16)$   
 $FPER( 3)=F2(X3 ,X17)$   
 $FPER( 4)=F2(X4 ,X18)$   
 $FPER( 5)=F2(X4 ,X19)$   
 $FPER( 6)=F2(X5 ,X7 )$   
 $FPER( 7)=F2(X3 ,X17)$   
 $FPER( 8)=F2(X3 ,X11)$   
 $FPER( 9)=F2(X6 ,X20)$   
 $FPER(10)=F2(X6 ,X17)$   
 $FPER(11)=F2(X7 ,X5 )$   
 $FPER(12)=F2(X7 ,X14)$   
 $FPER(13)=F2(X8 ,X22)$   
 $FPER(14)=F2(X8 ,X5 )$   
 $FPER(15)=F2(X9 ,X23)$   
 $FPER(16)=F2(X9 ,X24)$   
 $FPER(17)=F2(X10,X12)$   
 $FPER(18)=F2(X11,X6 )$   
 $FPER(19)=F2(X12,X10)$   
 $FPER(20)=F2(X12,X15)$   
 $FPER(21)=F2(X13,X25)$   
 $FPER(22)=F2(X13,X10)$   
 $FPER(23)=F2(X14,X8 )$   
 $FPER(24)=F2(X5 ,X26)$



```

FPER(25)=F2(X15,X13)
FPFR(26)=F2(X10,X27)
FPFR(27)=F2(X17,X28)
A3=(1+PORC)**2*HALT*PROF/4
A2=(1-PORC)**2*HALT*PROF/4
A1=(1-PORC)*HALT*PROF/2
A4=(1+PORC)*(1-PORC)*HALT*PROF/4
A5=(1-PORC)*PROF*LARG/2
A6=(1-PORC)**2*PROF*LARG/4
A7=(1+PORC)**2*PROF*LARG/4
A8=(1+PORC)*(1-PORC)*PROF*LARG/4
A10=(1-PORC)**2*HALT*LARG/4
A9=(1-PORC)*HALT*LARG/2
A11=(1+PORC)**2*HALT*LARG/4
A12=(1+PORC)*(1-PORC)*HALT*LARG/4
A13=(1-PORC)**2*HALT*PROF/((1+PORC)*2)
A14=(1-PORC)*HALT*PROF/(1+PORC)
A15=(1-PORC)**2*HALT*PROF/(2*(1+PORC))
A16=(1-PORC)**2*PROF*LARG/(2*(1+PORC))
A17=(1-PORC)*PROF*LARG/(1+PORC)
C CALCULO DO VETOR EXCITACAO
SS(1,3)=2*A1*FPAR(1)+2*A1*FPAR(3)-4*A2*FPAR(2)
SS(1,5)=2*A1*FPFR(4)+A14*FPER(6)-2*A13*FPFR(5)
SS(1,2)=2*A1*FPFR(1)-2*A13*FPER(2)+A14*FPER(3)
SS(1,7)=A3*FPAR(4)+A2*FPAR(7)-A4*FPAR(5)-A4*FPAR(6)
SS(1,8)=A7*FPFR(7)-A8*FPER(8)-A8*FPER(9)+A6*FPER(10)
SS(1,11)=A11*FPER(11)-A12*FPER(12)-A12*FPER(13)+A10*FPER(14)
SS(2,4)=2*A5*FPAR(3)+2*A5*FPAR(8)-4*A6*FPAR(9)
SS(2,5)=2*A5*FPFR(15)-2*A16*FPER(16)+A17*FPER(17)
SS(2,7)=A3*FPFR(18)-A4*FPFR(18)-A4*FPER(27)+A2*FPER(10)
SS(2,8)=A7*FPAR(10)+A6*FPAR(7)-A8*FPAR(11)-A8*FPAR(6)
SS(2,11)=A11*FPER(19)-A12*FPER(20)-A12*FPER(21)+A10*FPER(22)
SS(5,6)=2*A9*FPAR(17)+2*A9*FPAR(13)-4*A10*FPAR(14)
SS(5,7)=A3*FPER(23)-A4*FPER(12)-A4*FPER(24)+A2*FPER(14)
SS(5,8)=A7*FPER(25)-A8*FPER(20)-A8*FPER(26)+A10*FPER(22)
SS(5,11)=A11*FPAR(15)+A10*FPAR(18)-A12*FPAR(16)-A12*FPAR(17)
SS(1,4)=SS(1,2)
SS(2,3)=SS(1,2)
SS(3,4)=SS(1,2)
SS(1,6)=SS(1,5)
SS(3,5)=SS(1,5)
SS(3,6)=SS(1,5)
SS(3,9)=SS(1,7)
SS(1,10)=SS(1,8)
SS(3,8)=SS(1,8)
SS(3,10)=SS(1,8)
SS(1,12)=SS(1,11)
SS(3,11)=SS(1,11)
SS(3,12)=SS(1,11)
SS(2,6)=SS(2,5)
SS(4,5)=SS(2,5)
SS(4,6)=SS(2,5)
SS(2,9)=SS(2,7)
SS(4,7)=SS(2,7)
SS(4,9)=SS(2,7)
SS(4,10)=SS(2,8)
SS(2,12)=SS(2,11)
SS(4,11)=SS(2,11)
SS(4,12)=SS(2,11)
SS(5,9)=SS(5,7)
SS(6,7)=SS(5,7)
SS(6,9)=SS(5,7)
SS(5,10)=SS(5,8)
SS(6,8)=SS(5,8)
SS(6,10)=SS(5,8)
SS(6,12)=SS(5,11)
SS(1,9)=0.
SS(2,10)=0.
SS(3,7)=0.
SS(4,8)=0.
SS(5,12)=0.
SS(7,8)=0.
SS(6,11)=0.
SS(7,9)=0.

```



```

SS(7,10)=0.
SS(7,11)=0.
SS(7,12)=0.
SS(8,9)=0.
SS(8,10)=0.
SS(8,11)=0.
SS(8,12)=0.
SS(9,10)=0.
SS(9,11)=0.
SS(9,12)=0.
SS(10,11)=0.
SS(10,12)=0.
SS(11,12)=0.
SS(1,1)=-PROF*HALT
SS(2,2)=-PROF*LARG
SS(3,3)=SS(1,1)
SS(4,4)=SS(2,2)
SS(5,5)=-HALT*LARG
SS(6,6)=SS(5,5)
SS(7,7)=- (PORC**2)*PROF*HALT/(1-EMIMA)
SS(8,8)=- (PORC**2)*PROF*LARG/(1-EMIMA)
SS(9,9)=SS(7,7)
SS(10,10)=SS(8,8)
SS(11,11)=- (PORC**2)*HALT*LARG/(1-EMIMA)
SS(12,12)=SS(11,11)
DO30 I=1,12
DO40 J=I,12
SS(J,I)=SS(I,J)
40 CONTINUE
30 CONTINUE
DO 2000 LIN=1,12
DO 2100 KOL=1,12
SST(LIN,KOL)=SS(LIN,KOL)
2100 CONTINUE
2000 CONTINUE
CALL ARRAY(2,12,12,12,12,SST,SST)
CALL MINV(SST,12,D,L,M)
ELE=3.5*(PROF*LARG*HALT-PORC**3*PROF*LARG*HALT)/(2*(PROF*LARG+PROF
1*HALT+LARG*HALT)*(1+PORC**2))
CALL EMISS(PCO2,PH2O,PTOTA ,ELE,TGAS,EMGAS)
GS( 1)=PROF*HALT*EMGAS
GS( 2)=PROF*LARG*EMGAS
GS( 3)=GS(1)
GS( 4)=GS(2)
GS( 5)=HALT*LARG*EMGAS
GS( 6)=GS(5)
GS( 7)=PORC**2*GS(1)
GS( 8)=PORC**2*GS(2)
GS( 9)=GS(7)
GS(10)=GS(8)
GS(11)=PORC**2*GS(5)
GS(12)=GS(11)
N=12
DO 70 ISURS =1,6
DO 50 I=1,12
DO 60 J=1,12
SST(I,J)=SS(I,J)
60 CONTINUE
50 CONTINUE
CALL SURST(SST,GS,ISURS ,N,D1)
DET(!SURS )=D1
70 CONTINUE
DO 51 I=1,N
DO 52 J=1,N
SST(I,J)=SS(I,J)
52 CONTINUE
51 CONTINUE
CALL ARRAY(2,12,12,12,12,SS,SS)
CALL MINV (SS,12,D,L,M)
DO 80 I=1,12
DO 90 J=1,12
COFAT (I,J)=D*SS(I,J)
90 CONTINUE
80 CONTINUE

```

```

CALL ARRAY(7,12,12,12,12,COFAT ,COFAT )
CALL GMTRA(COFAT ,COFAT ,12,12)
C CALCULO TEMPERATURA INTERNA DAS PAREDES DO FORNO
  TMAT=TMAT+273
  DO 100 J=1,6
    W(J)=-PORC**2*(PROF*HALT*(COFAT(J,7)+COFAT(J,9))+PROF*LARG*(COFAT(
1J,8)+COFAT(J,10))+LARG*HALT*(COFAT(J,11)+COFAT(J,12)))
    W(J)=(W(J)*EMIMA*TMAT**4/(1-EMIMA)+DET(J)*TGAS**4)*4.88E-08/D
    T(J)=(W(J)/4.88E-08)**0.25-273
100 CONTINUE
  CALL GMPRD(SST,COFAT,PROD,N,N,N)
  T(1)=T(1)
  T(2)=T(2)
  T(3)=T(5)
  GO TO 1000
  25 CONTINUE
C FORMATO CILINDRICO
  X1=RAIO/HALT
  X2=HALT/RAIO
  X3=PORC*RAIO/HALT
  X4=HALT/(PORC*RAIO)
  X5=2.*PORC*RAIO/((1-PORC)*HALT)
  X6=(1-PORC)*HALT/(2.*RAIO)
  X7=1/PORC
  X8=(1+PORC)*HALT/(2.*PORC*RAIO)
  X9=(1-PORC)*HALT/(2*PORC*RAIO)
  FCIL(1)=F3(X1,X2)
  FCIL(2)=F3(X3,X2)
  FCIL(3)=F3(X3,X4)
  FCIL(4)=F3(X5,X6)
  CALL FAFOR(X7,X8,F41)
  FCIL(5)=0.5*(1-F41)
  CALL FAFOR(X7,X9,F42)
  FCIL(6)=0.5*(1-F42)
  FCIL(7)=F5(X7,X2)
  FCIL(8)=0.5*(1-F5(X7,X9*2/(1-PORC)))
  FCIL(9)=1+(1-PORC)*HALT/(4*RAIO)-SQRT(4*RAIO**2+((1-PORC)*HALT/2)*
1*2)/(2*RAIO)
  FCIL(10)=.5*(1.-FCIL(9))
  A1=3.141519*RAIO**2
  A2=3.141519*(PORC*RAIO)**2
  A3=3.141519*(1-PORC**2)*RAIO**2
  A4=3.141519*RAIO*(1-PORC)*HALT
  A5=3.141519*2*RAIO*PORC*HALT
  A6=3.141519*RAIO*(1+PORC)*HALT
C CALCULO DO VETOR EXCITACAO
  SZ(1,2)=A1*FCIL(8)
  SZ(1,3)=A1*FCIL(1)-2*A1*FCIL(2)+A2*FCIL(3)
  SZ(1,4)=A1*FCIL(4)
  SZ(1,5)=FCIL(5)*A6*PORC-FCIL(6)*A4*PORC
  SZ(2,2)=2*A4*FCIL(9)+A5*FCIL(7)-2*3.141519*RAIO*HALT
  SZ(2,4)=A4*FCIL(10)-A4*FCIL(6)
  SZ(2,5)=A6*FCIL(5)-A4*FCIL(6)
  SZ(2,3)=SZ(1,2)
  SZ(3,6)=SZ(1,4)
  SZ(3,5)=SZ(1,5)
  SZ(2,6)=SZ(2,4)
  SZ(1,1)=-A1
  SZ(1,6)=0.
  SZ(3,3)=SZ(1,1)
  SZ(3,4)=0.
  SZ(4,4)=-A2/(1-EMIMA)
  SZ(4,5)=0.
  SZ(4,6)=0.
  SZ(5,5)=-2*3.1415*PORC**2*RAIO*HALT/(1-EMIMA)
  SZ(5,6)=0
  SZ(6,6)=SZ(4,4)
  DO120 I=1,5
  DO 130 J=1,I
  SZ(I+1,J)=SZ(J,I+1)
130 CONTINUE
120 CONTINUE

```



```

ELF=3.5*(1-PORC**3)*3.141519*RAIO**2*HALT/(2*3.141519*RAIO**2+2*3.
1141519*RAIO*HALT)/(1+PORC**2)
CALL FMISS(PCO2,PH2O,PTOTA ,ELE,TGAS,EMGAS)
GZ(1)=3.141519*RAIO**2*EMGAS
GZ(2)=3.141519*RAIO*HALT*2*EMGAS
GZ(3)=GZ(1)
GZ(4)=PORC**2*GZ(1)
GZ(5)=PORC**2*GZ(2)
GZ(6)=GZ(4)
N=6
DO 160 ISURS =1,3
DO 140 I=1,6
DO 150 J=1,6
SSZ(I,J)=SZ(I,J)
150 CONTINUE
140 CONTINUE
CALL SURS (SSZ,GZ,ISURS,N,D1)
DET(:ISURS )=D1
160 CONTINUE
DO 61 I=1,N
DO 62 J=1,N
SS7(I,J)=S7(I,J)
62 CONTINUE
61 CONTINUE
CALL MINV(SZ,6,D,L1,M1)
DO 170 I=1,6
DO 180 J=1,6
COFAZ (I,J)=D*SZ(I,J)
180 CONTINUE
170 CONTINUE
CALL GMTRA(COFAZ ,COFAZ ,6,6)
C CALCULO TEMPERATURA INTERNA DAS PAREDES DO FORNO
DO 200 J=1,3
W(J)=-A2*(COFAZ(J,6)+COFAZ(J,4))-A6*PORC*COFAZ(J,5)
W(J)=W(J)*EMIMA*TMAT**4/(1-EMIMA)+DET(J)*TGAS**4
T(J)=(W(J)/D)**0.25-273
200 CONTINUE
CALL GMPRD(SSZ,COFAZ,PROZ,N,N,N)
26 FORMAT(1X,3E15,8)
1000 CONTINUE
1010 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE ENERG(KCOMB,TADM,ECEXO,PTOTA,ETA,POC,POH2O,PCCO,TGAS)
REAL N2FUM
DATA IPF,IRPF,IRTE,IOC4/' APF',' BPF',' RTE','IOC-4'/
C CALCULO DAS CARACTERISTICAS DO COMBUSTIVEL
IF(KCOMB.EQ.IRPF) GO TO 1
IF(KCOMB.EQ.IPF ) GO TO 2
IF(KCOMB.EQ.IOC4) GO TO 4
IF(KCOMB.EQ.IRTE) GO TO 5
C OLEO RPF
1 POS2=4.6
PCINF=9770.
PCINZ=0.0
POH2O=2.0
DENS=0.97
GO TO 10
C OLEO APF
2 POS2=2.8
PCINF=9810.
PCINZ=0.0
POH2O=2.0
DENS=.925
GO TO 10
C OLEO OC-4
4 POS2=1.4
PCINF=10180.
PCINZ=.001
POH2O=0.5
DENS=.865
GO TO 10
C OLEO RTE
5 POS2=0.95
PCINF=9800.
PCINZ=.0
POH2O=2.0
DENS=.94

```



```

10 POH2=26.-15*DENS
   POC=100.-(POH2+POS2+POH20+PCINZ)
   H2CO=POH2/200.
   CCOM=POC/1200.
   S2CO=POS2/3200
   H2OC=POH20/1800.
   CO2FU=CCOM
   H2OFU=H2CO+H2OC
   PS2=2*S2CO
   O2TEO=H2CO/2.+CCOM+PS2-H2OC/2.
   O2EMP=(1+EEXO)*O2TEO
   O2FUM=O2EMP-O2TEO
   N2FUM=79./21*O2EMP+PCINZ
   CALL TACOM(CO2FU,H2OFU,PS2,O2FUM,N2FUM,PCINF,TADM,ETA,TGAS,OUTWE)
   PCI=97000.*POC+57800.*POH2+70920.*PS2
   T=TGAS
   HO2=O2FUM*32*(7.2413+5.64E-04*T)/OUTWE
   HCO2=CO2FU*(5.86684*T**0.1036)*44/OUTWE
   HN2=N2FUM*(6.9807+4.755E-04*T)*28/OUTWE
   HH2O=H2OFU*(7.9823+0.001171*T)*18/OUTWE
   HSO2=PS2*(7.0076*T**0.0784)*64/OUTWE
   PCCO=PCI-(HO2+HCO2+HN2+HH2O+HSO2)*(T-18)
   PESO=(POH2*2.+POC*12.+POS2*32.+POH20*18.)/100.
   PCCO=PCCO/PESO
   POC=PTOTA*POC/100.
   POH2=PTOTA*POH2/100.
C PCI FM KCAL/KG
   RETURN
   END
SURROUTINE FAFOR(X,Y,F4)
C CALCULO DO FATOR DE FORMA
   COS1=((Y/X)**2+(1/X)**2-1)/((Y/X)**2-(1/X)**2+1)
   COS2=COS1/X
   SEN3=1/X
   SEN2=SQRT(1-COS2**2)
   SEN1=SQRT(1-COS1**2)
   COS3=SQRT(1-SEN3**2)
   TG1=ARS(SEN1/COS1)
   TG2=ARS(SEN2/COS2)
   TG3=SEN3/COS3
   IF(COS1) 10,15,15
10 ACTG1=3.141519-ATAN(TG1)
   GO TO 20
15 ACTG1=ATAN(TG1)
20 IF(COS2) 25,30,30
25 ACTG2=3.141519-ATAN(TG2)
   GO TO 35
30 ACTG2=ATAN(TG2)
35 ACTG3=ATAN(TG3)
   PI=3.141519
   F4=1/X-1/(PI*X)*(ACTG1-1/((2*Y)*(SQRT((X**2+Y**2+1)**2-(2*X)**2))*ACTG2+(Y**2-X**2+1)*ACTG3-PI*(Y**2+X**2-1)/2))
   RETURN
   END
SURROUTINE EMISS(PCO2,PH20,PTOTA,ELE,TGAS,EMGAS)
E1(PXGRA,P)=-0.283265E-01+0.05913613*PXGRA+0.01322305*P+0.01311278
1*P*PXGRA-0.7357554E-04*PXGRA**2-0.2415583E-02*P**2-0.0353586*PXGRA
2**3+0.1157061E-03*P**3+0.1076923E-02*PXGRA*P**2-0.1792161E-01*P*PX
3GRA**2
E2(PXGRA,P)=-0.6763227E-02+0.1895105E-01*PXGRA+0.1167794E-01*P-0.2
1945439E-04*PXGRA**2-0.3885546E-02*P**2+0.2626923E-01*P*PXGRA-0.215
28301E-01*PXGRA**3+0.3619952E-03*P**3-0.5444755E-03*PXGRA*P**2-0.22
315102E-01*P*PXGRA**2
E3(PXGRA,P)=-0.3246629E-01+0.7479446E-01*PXGRA+0.4559773E-01*P+0.9
178577E-04*PXGRA**2-0.1537189E-01*P**2+0.2442238E-01*P*PXGRA-0.9529
2407E-01*PXGRA**3+0.160071E-02*P**3-0.134625E-02*PXGRA*P**2-0.15634
335E-01*P*PXGRA**2
C CALCULO DA RADIAÇÃO DOS GASES NO INTERIOR DO FORNO
   PXGRA=PH20/(PCO2+PH20)
   P=(PCO2+PH20)*ELE/0.305
   PW=PH20
   PC=PCO2

```

```

TGAS=TGAS*1.8+492
PCL=PCO2*ELE/0.305
ECO2=1.835978E-08*(TGAS**(-0.341379*ALOG(1.08365E-06*TGAS)))*((PCL
1)**(-0.0318444*ALOG(PCL)+0.08994081*ALOG(0.008966*TGAS)))
CCO2=0.97503*PTOTA ** (0.16040-0.05809*ALOG(PCL))
PWL=PW*ELE/0.305
EH2O=4.326F-07*(TGAS**(4.264474-0.325764*ALOG(TGAS)))*(PWL**(-0.75
187488-0.0463185*ALOG(PWL)+0.16512113*ALOG(TGAS)))
CH2O=1.37713*((PW+PTOTA)/2)**ALOG(1.70823*((PTOTA+PW)/2)**0.050118
18)/PWL**ALOG(1.044404*PWL**0.63111E-03*((PW+PTOTA)/2)**0.062397)
TGAS=TGAS-460
IF(TGAS-260) 10,10,20
20 IF(TGAS-1000)30,40,50
50 IF(TGAS-1700)60,70,70
10 EMIS=E1(PXGRA,P)
GO TO 80
30 EMIS=E1(PXGRA,P)+(TGAS-260)*(E2(PXGRA,P)-E1(PXGRA,P))/(1000-260)
GO TO 80
40 EMIS=E2(PXGRA,P)
GO TO 80
60 EMIS=E2(PXGRA,P)+(TGAS-1000)*(E3(PXGRA,P)-E2(PXGRA,P))/(1700-1000)
GO TO 80
70 EMIS=E3(PXGRA,P)
80 EMGAS =ECO2*CCO2+EH2O*CH2O-EMIS
TGAS=(TGAS- 32)/1.8
RETURN
END
SUBROUTINE SURST(SST,GS,ISUBS,N,D1)
DIMENSION SST(12,12),GS(12),L(12),M(12)
DO 10 I=1,N
DO 20 J=1,N
IF(J-ISURS)30,40,30
40 SST(I,J)=-GS(I)
GO TO 20
30 SST(I,J)=SST(I,J)
20 CONTINUE
10 CONTINUE
IF(N-6) 25,25,26
26 CONTINUE
GO TO 27
27 CONTINUE
25 CONTINUE
CALL ARRAY(2,N,N,12,12,SST,SST)
CALL MINV (SST,N,D,L,M)
D1=D
RETURN
END
SUBROUTINE TLIM(I,TALT)
COMMON TCRIT(14),RO,PTOTA,PORC,TGAS,EMIMA,EISO,TMAT,KFORM,HALT,PRO
IF,LARG,RAIO,T(6),PCO2,PH2O,PCCO,TAR,EMIEX,NCAM,ISO(5),XIS(5),YPIS(
25),TO,CRCOM,TADM,V,DINT,VAR
DATA IA,IB,IZ,ID,IE/' 1',' 2',' 3',' 4',' 5'/
DATA IF,IG,IH,IJ,IK/' 6',' 8',' 9',' 10',' 11'/
DATA IL,IM,IN,IO/' 12',' 14','IS-5','IS-6'/
C DEFINICAO-DAS TEMPERATURAS ADMISSIVEIS MAXIMAS DOS MATERIAIS DE REVES-
C TIMENTO
IF(I.EQ. IA) GO TO 1
IF(I.EQ. IB) GO TO 2
IF(I.EQ. IE) GO TO 4
IF(I.EQ. ID) GO TO 5
IF(I.EQ. IE) GO TO 7
IF(I.EQ. IF) GO TO 8
IF(I.EQ. IG) GO TO 10
IF(I.EQ. IH) GO TO 13
IF(I.EQ. IJ) GO TO 14
IF(I.EQ. IK) GO TO 17
IF(I.EQ. IL) GO TO 25
IF(I.EQ. IM) GO TO 19
IF(I.EQ. IN) GO TO 16
IF(I.EQ. IO) GO TO 11
1 TALT=TCRIT(1)
GO TO 20
2 TALT=TCRIT(2)
GO TO 20
4 TALT=TCRIT(3)
GO TO 20

```



```

5 TALT=TCRIT(4)
  GO TO 20
7 TALT=TCRIT(5)
  GO TO 20
8 TALT=TCRIT(6)
  GO TO 20
10 TALT=TCRIT(7)
  GO TO 20
11 TALT=TCRIT(8)
  GO TO 20
13 TALT=TCRIT(9)
  GO TO 20
14 TALT=TCRIT(10)
  GO TO 20
16 TALT=TCRIT(11)
  GO TO 20
17 TALT=TCRIT(12)
  GO TO 20
19 TALT=TCRIT(13)
  GO TO 20
25 TALT=TCRIT(14)
20 CONTINUE
  RETURN
  END
  SUBROUTINE COTIR(I,X,Y,C)
  COMMON TCRIT(14),RO,PTOTA,PORC,TGAS,EMIMA,EISO,TMAT,KFORM,HALT,PRO
  IF,LARG,RAIO,T(6),PCO2,PH2O,PCCO,TAR,EMIEX,NCAM,ISO(5),XIS(5),YPIS(
  25),TO,CRCOM,TADM,V,DINT,VAR
  DATA IA,IB,IZ,ID,IE/' 1',' 2',' 3',' 4',' 5'/
  DATA IF,IG,IH,IJ,IK/' 6',' 8',' 9',' 10',' 11'/
  DATA IL,IM,IN,IO/' 12',' 14',' IS-5',' IS-6'/
C CALCULO DA CONDUTIBILIDADE TERMICA DOS REFRATARIOS E ISOLANTES
  IF(I.EQ. IA) GO TO 3
  IF(I.EQ. IB) GO TO 4
  IF(I.EQ. IZ) GO TO 6
  IF(I.EQ. ID) GO TO 7
  IF(I.EQ. IE) GO TO 9
  IF(I.EQ. IF) GO TO 10
  IF(I.EQ. IG) GO TO 12
  IF(I.EQ. IH) GO TO 15
  IF(I.EQ. IJ) GO TO 16
  IF(I.EQ. IK) GO TO 19
  IF(I.EQ. IL) GO TO 21
  IF(I.EQ. IM) GO TO 22
  IF(I.EQ. IN) GO TO 18
  IF(I.EQ. IO) GO TO 13
3 C=0.345+0.12589*ALOG((X+Y)/2)
  GO TO 25
4 C=0.7092*((X+Y)/2)**0.08
  GO TO 25
6 C=1.1543+0.0001*(X+Y)/2
  GO TO 25
7 C=1.576-8.28E-04*(X+Y)/2+5.03E-07*((X+Y)/2)**2
  GO TO 25
9 C=2.125-1.368E-03*(X+Y)/2+6.855E-07*((X+Y)/2)**2
  GO TO 25
10 C=2.674-1.902E-03*(X+Y)/2+8.665E-07*((X+Y)/2)**2
  GO TO 25
12 C=0.01986*((X+Y)/2)**.3931
  GO TO 25
13 C=92.6578E-06*EXP(173.91E-03*RO)*(32+1.8*(X+Y)/2)**(1.44794-0.035*
  1RO)
  GO TO 25
15 C=0.215+(X+Y)/2*0.00017
  GO TO 25
16 C=0.25+0.00015*(X+Y)/2
  GO TO 25
18 C=.000372484*(32+1.8*(X+Y)/2)**1.16794

```



```

      GO TO 25
19  C=0.40714+0.00024*(X+Y)/2
      GO TO 25
21  C=6.326E-01-3.591E-04*(X+Y)/2+2.077E-07*((X+Y)/2)**2
      GO TO 25
22  C=8.47E-01-1.852E-04*(X+Y)/2+9.792E-08*((X+Y)/2)**2
25  CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE ARRAY(MODE,I,J,N,M,S,D)
      DIMENSION S(1),D(1)
      NI=N-I
      IF(MODE=1)100,100,120
100  IJ=I*J+1
      NM=N*J+1
      DO 110 K=1,J
      NM=NM-NI
      DO 110 L=1,I
      IJ=IJ-1
      NM=NM-1
110  D(NM)=S(IJ)
      GO TO 140
120  IJ=0
      NM=0
      DO 130 K=1,J
      DO 125 L=1,I
      IJ=IJ+1
      NM=NM+1
125  S(IJ)=D(NM)
130  NM=NM+NI
140  RETURN
      END
      SUBROUTINE GMPROD(A,B,R,N,M,L)
      DIMENSION A(1),B(1),R(1)
C  PRODUTO DE DUAS MATRIZES
      IR=0
      IK=-M
      DO 10 K=1,L
      IK=IK+M
      DO 10 J=1,N
      IR=IR+1
      JI=J-N
      IB=IK
      R(IR)=0
      DO 10 I=1,M
      JI=JI+N
      IR=IR+1
10  R(IR)=R(IR)+A(JI)*B(IB)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE GMTRA(A,R,N,M)
      DIMENSION A(1),R(1)
C  TRANSPOSTA DE UMA MATRIZ
      IR=0
      DO 10 I=1,N
      IJ=I-N
      DO 10 J=1,M
      IJ=IJ+N
      IR=IR+1
10  R(IR)=A(IJ)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE MINV(A,N,D,L,M)
      DIMENSION A(1),L(1),M(1)
C  INVERSA DE UMA MATRIZ
      D=1.0
      NK=-N
      DO 90 K=1,N
      NK=NK+N
      L(K)=K
      Y(K)=K
      KK=NK+K
      RIGA=A(KK)

```

```

DO 20 J=K,N
  IZ=N*(J-1)
  DO 20 I=K,N
    IJ=IZ+I
10  IF(ABS(RIGA)-ABS(A(IJ))) 15,20,20
15  RIGA=A(IJ)
    L(K)=I
    M(K)=J
20  CONTINUE
    J=L(K)
    IF(J-K)35,35,25
25  KI=K-N
    DO 30 I=1,N
      KI=KI+N
      HOLD=-A(KI)
      JI=KI-K+J
      A(KI)=A(JI)
30  A(JI)=HOLD
35  I=M(K)
    IF(I-K) 45,45,38
38  JP=N*(I-1)
    DO 40 J=1,N
      JK=NK+J
      JI=JP+J
      HOLD=-A(JK)
      A(JK)=A(JI)
40  A(JI)=HOLD
45  IF(ABS(RIGA)-1.E-20)46,46,48
46  D=0.0
    RETURN
48  DO 55 I=1,N
    IF(I-K)50,55,50
50  IK=NK+I
    A(IK)=A(IK)/(-RIGA)
55  CONTINUE
    DO 65 I=1,N
      IK=NK+I
      HOLD=A(IK)
      IJ=I-N
      DO 65 J=1,N
        IJ=IJ+N
        IF(I-K) 60,65,60
60  IF(J-K) 62,65,62
62  KJ=IJ-I+K
    A(IJ)=HOLD*A(KJ)+A(IJ)
65  CONTINUE
    KJ=K-N
    DO 75 J=1,N
      KJ=KJ+N
      IF(J-K) 70,75,70
70  A(KJ)=A(KJ)/RIGA
75  CONTINUE
    D=D*RIGA
    A(KK)=1./RIGA
80  CONTINUE
    K=N
100 K=K-1
    IF(K)150,150,105
105 I=L(K)
    IF(I-K) 120,120,108
108 JG=N*(K-1)
    JR=N*(I-1)
    DO 110 J=1,N
      JK=JG+J
      HOLD=A(JK)
      JI=JR+J
      A(JK)=-A(JI)
110 A(JI)=HOLD
120 J=M(K)
    IF(J-K) 100,100,125
125 KI=K-N
    DO 130 I=1,N
      KI=KI+N
      HOLD=A(KI)

```



```

      JI=KI-K+J
      A(KI)=-A(JI)
130  A(JI)=HOLD
      GO TO 100
150  RETURN
      END
      SUBROUTINE SURS (SSZ,GZ,ISUBS,N,D1)
      DIMENSION SSZ(6,6),GZ(6),L(6),M(6)
      DO 10 I=1,N
      DO 20 J=1,N
      IF(J-ISUBS)30,40,30
40   SSZ(I,J)=-GZ(I)
      GO TO 20
30   SSZ(I,J)=SSZ(I,J)
20   CONTINUE
10   CONTINUE
      IF(N=6) 25,25,26
26   CONTINUE
      GO TO 27
27   CONTINUE
25   CONTINUE
      CALL ARRAY(2,N,N,6,6,SSZ,SSZ)
      CALL MINV (SSZ,N,D,L,M)
      D1=D
      RETURN
      END
      SUBROUTINE TACOM(YCO2,YH2O,YSO2,YO2,YN2,PCINF,TADM,ETA,TGAS,PESO)
C  TEMPERATURA ADIABATICA DE COMBUSTAO
      PESO=YCO2*44+YH2O*18+YSO2*64+YO2*32+YN2*28
      ALFA=(-3.545E-06*YCO2+.283E-06*YH2O+3.511E-06*YSO2-.001E-06*YN2-.9
123E-06*YO2)/3.
      BETA=(10.396*YCO2+2.298*YH2O+9.512*YSO2+1.25*YN2+3.102*YO2)*10**(-
23.)/2.
      GAMA=6.214*YCO2+7.256*YH2O+7.116*YSO2+6.524*YN2+6.148*YO2
      T1=TADM+273.
      T2=T1
      DELTA=PCINF+ALFA*T1**3+BETA*T1**2+GAMA*T1
      DELTA=DELTA*ETA
30  TR=(DELTA-BETA*T2**2-ALFA*T2**3)/GAMA
      TR=(TR+T2)/2.
      IF(ABS((TR-T2)/TR)-.02) 20,20,38
38  T2=TR
      GO TO 30
20  A=ALFA
      B=A*TR+BETA
      C=B*TR+GAMA
      DESCR=B**2-4*A*C
      IF(DESCR) 50,26,27
27  TR1=(-B+SQRT(DESCR))/(2*A)
      TR2=(-B-SQRT(DESCR))/(2*A)
      IF(TR1) 28,28,29
29  IF(TR-TR1) 50,50,31
31  TR=TR1
28  IF(TR2) 32,32,33
33  IF(TR-TR2) 50,50,34
34  TR=TR2
32  GO TO 50
26  TR2=-B/(2*A)
      GO TO 28
50  TGAS=TR*.731
      TGAS=TGAS-273.
      RETURN
      END
      SUBROUTINE FLUTE(TINT,EOT,TMOT,OCOND)
      DIMENSION TMOT(6),TM(6),PROPK(6),DELT(6),DL(6),EOT(6),TZ(6)
      COMMON TCRIT(14),RO,PTOTA,PORC,TGAS,EMIMA,EISO,TMAT,KFORM,HALT,PRO
1F,LARG,RAIO,T(6),PCO2,PH2O,PCCO,TAR,EMIEX,NCAM,ISO(5),XIS(5),YPIS(
25),TO,CRCOM,TADM,V,DINT,VAR
C  DETERMINACAO DA TEMPERATURA INTERFACE,METODO NEWTON-RAPHSON
      E=EMIEX
      IF(KFORM)37,37,38
38  DO 400 IL=1,NCAM
400  DL(IL)=EOT(NCAM-IL+1)*1000.

```



```

GO TO 306
37 SA=DINT*1000.
DO 405 LI=1,NCAM
DL(NCAM-LI+1)=SA+2*EOT(LI)*1000.
405 SA=DL(NCAM-LI+1)
IINT=NCAM+1
DL(IINT)=DINT*1000.
306 JOTA=1
JX=0
TZ(1)=TAR+30.
IF(NCAM=1) 17,17,16
16 CONTINUE
DO 15 J=2,NCAM
TZ(J)=(TZ(J-1)+TINT)/2.
15 CONTINUE
17 CONTINUE
TZ(NCAM+1)=TINT
DO 20 J=1,NCAM
TM(J)=(TZ(J)+TZ(J+1))/2.
20 CONTINUE
I=NCAM
DO 30 J=1,I
TX=TM(J)
TY=TM(J)
LL1=ISO(NCAM-J+1)
CALL COTIR(LL1,TX,TY,C)
PROPK(J)=C
20 CONTINUE
IF(KFORM=1) 35,40,40
35 SOMA=0.
DO 45 J=1,I
L=I-J+1
SOMA=SOMA+((ALOG(FLOAT(DL(L))/DL(L+1))))/PROPK(L))*DL(1)/2.
45 CONTINUE
GO TO 55
40 SOMA=0.
DO 55 J=1,I
SOMA=SOMA+DL(J)/PROPK(J)
55 CONTINUE
IF(JX) 172,174,172
174 QCOND=((TINT-TZ(1))/SOMA)*1000.
202 CONTINUE
CALL NFRAP(E,TZ(1),TAR,V,QCOND,VAR,T01)
IF(ABS(TZ(1)-T01)-2.) 171,171,65
171 JX=1
GO TO 60
65 TZ(1)=(TZ(1)+T01)/2.
GO TO 15
60 IF(KFORM=1) 75,80,80
75 CONTINUE
JOTA=JOTA+1
DO 85 J=1,I
L=I-J+1
DELT(L)=QCOND*DL(1)*((ALOG(FLOAT(DL(L))/DL(L+1))))/PROPK(L))/2000.
85 CONTINUE
GO TO 95
90 CONTINUE
JOTA=JOTA+1
DO 95 J=1,I
DELT(J)=(QCOND*DL(J)/PROPK(J))*0.001
95 CONTINUE
TZ(I)=TINT-DELT(I)
DO 100 J=1,I
MI=I-J+1
M=I-J+2
TZ(MI)=TZ(M)-DELT(MI)
100 CONTINUE
GO TO 15
172 QCND1=((TINT-TZ(1))/SOMA)*1000.
CALL NERAP(E,TZ(1),TAR,V,QCOND,VAR,T01)
IF(ABS((QCND1-QCOND)/QCOND)-.001) 150,150,61
61 QCOND=QCND1
GO TO 202
150 CONTINUE

```

```

DO 403 IZ=1,NCAM
403 TMOT(IZ)=TZ(NCAM-IZ+2)
   TMOT(IZ)=TZ(1)
   RETURN
   END
SUBROUTINE NERAP(F,T,TAR,C,QCOND,VAR,T01)
C MTODO DE PESQUISA DE RAIZ POR NEWTON-RAPHSON
T01=T+273
TAR=TAR+273
7 IF(VAR) 4,4,8
4 FTEMP=QCOND-4.96E-08*E*(T01**4-TAR**4)-2.73*C*((2./(T01+TAR))**0.1
18)*((T01-TAR)**1.27)
FDERT=(-4.)*4.96E-08*E*T01**3-2.73*C*(2.**0.18)*(((T01+TAR)**(-0.8
12))*((T01-TAR)**1.27+((T01+TAR)**(-0.18))*1.27*(T01-TAR)**0.27)
GO TO 9
8 FTEMP=QCOND-4.96E-08*E*(T01**4-TAR**4)-(5.68+4.19*VAR)*(T01-TAR)*.
186
FDERT=(-4.)*4.96E-08*E*T01**3-(5.68+4.19*VAR)*.86
9 T012=T01-FTEMP/FDERT
TCOMP=ABS(T01-T012)
IF(TCOMP-.5) 1,1,2
1 T01=T012-273
TAR=TAR-273
GO TO 3
2 T01=T012
GO TO 7
3 CONTINUE
RETURN
END

```



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AFGAN, N.H. & SCHLÜNDER, E.U. Heat Exchangers: Design and Theory Sourcebook. Washington, McGraw Hill, 1974. 893p.
2. ANDERSON, H.V. Chemical Calculations. New York, McGraw Hill, 1955. 305p.
3. AYRES, Jr. Frank. Matemática Financeira. São Paulo, McGraw Hill, 1972.
4. BABCOCK & WILCOX Fibras Cerâmicas. Rio de Janeiro, s.d.8p.
5. BARACAT, D.E. Fluxo Térmico Através de Paredes de Fornos. São Paulo, DEM-EPUSP, 1977. 37p.
6. BENNETT, C.O. & MYERS, J.E. Fenômenos de Transporte: Quantidade de Movimento, Calor e Massa. São Paulo, McGraw Hill, 1978. 812 p.
7. BRADLEY, J. Tasme. February, 1946.
8. CALORISOL. Isolantes Térmicos. São Paulo, 1977. n.p.
9. CBIT. Isolantes Térmicos. São Paulo, 1977. n.p.
10. CHVETE, I. et all. Thermique Générale. Moscou, Editions Mir, 1969. 509p.
11. DAVIES, Clive. Calculations in Furnace Technology. Oxford Pergamon Press, 1970. 270pp.
12. DAVIS, D.S. Nomografia y Ecuaciones Empiricas. México, Editorial Continental, 1965. 309p.
13. ECKERT, E.R.G. & DRAKE, R.M. Heat and Mass Transfer. Tokyo, McGraw Hill, s.d. 530p.
14. ESSO. Combustão e Combustíveis Industriais. s.n.t. 30p.
15. FIBRAVID. Isolação Térmica na Construção e na Indústria. São Paulo, s.e., s.d. 71p.
16. FLEISHER, G.A. Teoria da Aplicação do Capital: Um Estudo das Decisões de Investimento. São Paulo, Edgard Blücher, 1973. 272p.



17. FRANCIS, W. Los Combustibles y su Tecnologia. Bilbao, Urno, 1969. 688p.
18. FRISTON, R.M. & WESTENBERG, A.A. Flame Structure. New York, McGraw Hill, 1965. 424p.
19. GILCHRIST, J.D. Hornos. Madrid, Editorial Alhambra, 1969. 167p.
20. GOMIDE, R. Estequiometria Industrial. São Paulo, Cenpro, 1968. 423p.
21. GOTTFRIED, B.S. & WEISMAN, J. Introduction to Optimization Theory. New Jersey, Prentice Hall, 1973. 569p.
22. SILVA, Remi Benedito et all. Manual de Transmissão de Calor. São Paulo, s.ed. s.d.
23. HAMMING, R.W. Numerical Methods for Scientists and Engineers Tokyo, Kogakusha, s.d. 720p.
24. HIMMELBLAU, D.M. Applied Nonlinear Programming. New York, McGraw Hill, 1972. 498p.
25. HOTTEL, H.C. & SAROFIM, A.F. Radiative Transfer. New York, McGraw Hill, 1967. 516p.
26. HOTTEL, H.C. Chemical Engineering Handbook. New York, McGraw Hill, 1950. 3a. ed. pp.493.495.
27. HOTTEL, H.C. & SMITH, V.C. Tasme. 1935. v.57. pp.463-470.
28. HOUGEN, O.A. & WATSON, K.M. Industrial Chemical Calculations. New York, John Wiley, 1955. 487p.
29. IBAR. Refratários. São Paulo, s.ed. s.d. 107p.
30. INDUTERM. Fornos Industriais. s.n.t. n.p
31. ISACHENKO, V. et all. Heat Transfer. Moscou, Mir Publishers, 1969. 552p.
32. JAKOB, Max. Heat Transfer. New York. McGraw Hill, 1964. 2v.
33. KANTHAL. Konstruktions Hadbuch, Schweden, s.ed. 1966. n.p.
34. KAYS, W.M. Convective Heat and Mass Transfer. New Delhi, Tata, 1975. 387p.

35. KAZANTSEV, E.I. Industrial Furnaces. Romania, Mir Publishers s.d. 375p.
36. KEENAN, J.H. & KAYE, J. Gas Tables. New York, John Wiley, 1961. 238p.
37. KELLER, J.D. Tasme. 15 Dec. 1933, IS-55-6.
38. KERN, D.Q. Process Heat Transfer. Tokyo, Kogakusha, s.d. 870p.
39. KIRILLIN, V.A. et all. Termodinâmica Técnica. Moscú, Editorial Mir, 1976. 599p.
40. KOTHANDARAMAN, C.P. & SUBRAMANYAN, S. Heat and Mass Transfer Data Book. New York, John Wiley & Sons, 1975. 143p.
41. KRANJC, Andrej. Fornos Industriais In: Metalurgia Geral, (São Caetano do Sul), 1977. 32p.cap.5.
42. KREITH, F. Princípios da Transmissão de Calor. São Paulo, Edgard Blücher, 1977. 550p.
43. KREYZIG, E. Advanced Engineering Mathematics. New York, John Wiley & Sons, 1972. 866p.
44. MANRIQUE, J.A. & CARDENAS, R.S. Termodinâmica. México, Harper & Row, 1976. 338p.
45. McADAMS, W.H. Heat Transmission. Tokyo, Kogakusha, s.d. 532p.
46. MIKHEYEV, M. Fundamentals of Heat Transfer. Moscow, Peace Publishers, 1966. 374p.
47. NORTON, F.H. Refractories. New York, McGraw Hill, 1959. 782p.
48. ÖZISIK, M.N. Radiative Transfer and Interactions with Conduction and Convection. New York, John Wiley & Sons, 1973. 575p.
49. PEEBLES, J.C. Furnace Efficiency. Chicago, Joseph G.Branch, 1914. 156p.
50. PERRY, R.H. & CHILTON, C.H. Chemical Engineers' Handbook, Tokyo, Kogakusha, 5a. ed. s.d.



51. POLAK, E. Computational Methods in Optimization, A Unified Approach. Mathematics in Science and Engineering. London, Academic Press, 1971. v.77, p.126-207, p.299-316.
52. POWELL, A.R. Liquid Fuels. Gas Engineers Handbook. New York, Industrial Press, 1974, Chap.4, Sec.2.
53. RALSTON, A. & WILF, H.S. Mathematical Methods for Digital Computers. New York, John Wiley & Sons, 1960. 2v.
54. REFRATÁRIOS SÃO CAETANO. Produtos, s.n.t., n.p.
55. ROCKWOOLBRAS. Catálogo Técnico, s.n.t., n.p.
56. ROHSENOW, W.M. & HARTNETT, J.M. Handbook of Heat Transfer, New York, McGraw Hill, 1973. Sec.15. p.1-93.
57. SCHNEIDER, P.J. Conduction Heat Transfer. Massachusetts, Addison-Wesley, 1957. 394p.
58. SEGELER, C.G. Combustion. Gas Engineers Handbook. New York, Industrial Press, 1974. Chap.5 Sec.2.
59. SHAHEEN, E.I. Basic Practice of Chemical Engineering. Boston, Houghton Mifflin, 1975. 438p.
60. SMITH, J.M. & NESS, H.C.V. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. Tokyo, Kogakusha, 1976. 490p.
61. SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G. Statistical Methods. Iowa, Iowa State University Press, 1976. 593p.
62. SPARROW, E.M. & CESS, R.D. Radiation Heat Transfer. California, Brooks/Cole, 1966. 321p.
63. STONE, R.L. Heat Transfer. Gas Engineers Handbook. New York, Industrial Press, Chap.6, Sec.2.
64. TRINKS, W. & MAWHINNEY, M.H. Hornos Industriales. Bilbao, Urmo, 1971. 2v.
65. WALKER, Harbison. Refractories. Modern Refractory Practice. Cleveland, William Feather, 1961. 607p.
66. WEIL, L. Elements des Échanges Thermiques. Paris, Gauthier-Villars, 1965. 227p.
67. WYLEN, G.J.V. & SONNTAG, R.E. Fundamentos da Termodinâmica Clássica. São Paulo, Edgard Blücher, 1970. 616p.