

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE UM GERADOR DE VAPOR  
A ÓLEO COMBUSTÍVEL

ALUNO: XAVIER PONCE JARENO  
PROF. ORIENTADOR: HILDO PERA

1990

## ÍNDICE

### COMENTÁRIOS INICIAIS

1 - INTRODUÇÃO

2 - JUSTIFICATIVA PARA O PROJETO

3 - DADOS DE PROJETO

4 - DESCRIÇÃO DE UM GERADOR DE VAPOR

4.1 - Introdução

4.2 - Descrição do Funcionamento

4.3 - Componentes Clássicos

5 - CÁLCULOS TÉRMICOS

5.1 - Cálculos Preliminares

5.2 - Cálculos da Combustão

6 - DIMENSIONAMENTO DA FORNALHA

6.1 - Determinação do Calor Total Introduzido na  
Fornalha

6.2 - Volume da Câmara de Combustão

6.3 - Dimensões da Fornalha

## 7 - DIMENSIONAMENTO DA CALDEIRA

- 7.1 - Calor Absorvido por Irradiação
- 7.2 - Calor Fornecido ao Feixe de Tubos
- 7.3 - Calor Fornecido ao Economizador
- 7.4 - Calor Fornecido ao Pré-Aquecedor de Ar
- 7.5 - Saldo de Calor para Chaminé
- 7.6 - Balanço Térmico
- 7.7 - Determinação das Temperaturas
- 7.8 - Determinação do Feixe de Convecção

## 8 - PERDAS DE CALOR

- 8.1 - Definição
- 8.2 - Determinação das Perdas de Calor

## BIBLIOGRAFIA

## ANEXOS

## COMENTÁRIOS INICIAIS

As instalações geradoras de vapor surgiram com a revolução industrial para servir como fonte de energia para movimentar as máquinas da emergente indústria textil inglesa.

Com a evolução tecnológica mundial, as instalações geradoras de vapor foram ganhando importância cada vez maior no meio industrial, pois o vapor passou a ser indispensável em indústrias químicas, de plásticos, petrolíferas, textil, de cortumes, de papel, etc.

Nas centrais termoelétricas o vapor é importantíssimo, pois é ele o responsável pela propulsão das turbinas que movimentam os geradores elétricos.

Os primeiros geradores de vapor utilizavam como combustível o carvão mineral, posteriormente foram surgindo geradores que utilizavam os óleos combustíveis derivados de petróleo.

Com o advento da crise do petróleo surgiu a necessidade de se desenvolver combustíveis alternativos para geração de vapor, surgiram então várias opções como carvão vegetal, bagaço de cana, casca de madeira, gás natural, etc.

Neste trabalho é apresentado o projeto de um gerador de vapor que utiliza como combustível óleo derivado de petróleo.

## 1- INTRODUÇÃO

Gerador de vapor é um trocador de calor complexo que produz vapor a partir de energia térmica (combustível), ar e fluido vaporizante, constituído por diversos equipamentos associados, perfeitamente integrados, a fim de permitir a obtenção do maior rendimento térmico possível. Essencialmente, uma caldeira de vapor, é constituída por um vaso fechado a pressão, com tubos, no qual se introduz água, que pela aplicação externa de calor se transforma continuamente em vapor.

### Tipos Fundamentais

Existem dois tipos fundamentais de geradores de vapor, ambos compreendendo corpo e tubos:

- Caldeiras tubos de fumaça, nas quais os gases da combustão (fumos) atravessam toda a caldeira pelo interior dos tubos, cedendo calor à água contida no corpo e que envolve todos os tubos.

- Caldeiras de tubo de água ou aquotubulares, nas quais os fumos atravessam toda a caldeira, externamente aos tubos, cedendo calor à água contida no interior dos mesmos e também dos corpos.

### Seleção do tipo de gerador de vapor

Selecionar um gerador de vapor é estabelecer qual o tipo de equipamento mais indicado para satisfazer a uma determinada aplicação. A seleção leva em consideração vários fatores:

- Disponibilidade Energética
- Características da Energia
- Pressão e Temperatura do Vapor
- Variação da Demanda de Vapor
- Eficiência Térmica
- Custo da Instalação, Operação e Manutenção
- Espaço Disponível
- Amortização de Investimento

## 2- JUSTIFICATIVA PARA ESCOLHA DO PROJETO

Vive-se atualmente, no país e no mundo, uma oferta abundante de petróleo e seus derivados. Entre esses derivados estão o querosene, e os óleos. Os óleos, principalmente, os de BPF apresentam hoje importância econômica extraordinária no mundo.

Além da oferta abundante, o suprimento seguro, a facilidade de manuseio e estocagem, o proporcionamento de operação limpa e completamente automatizada, dado o notável avanço tecnológico dos aparelhos de queima, deu ao óleo combustível, posição destacada como fonte geradora de calor nas caldeiras de qualquer porte.

Nestes últimos cinquenta anos, a indústria produtora de equipamentos atingiu um grau de aperfeiçoamento no aproveitamento desta fonte de energia que trouxe benefícios incontáveis a indústria consumidora.

Dentro deste contexto, deve-se desenvolver equipamentos adequados à utilização do óleo como fonte de energia, sendo este o objetivo que consubstancia o presente trabalho.

### 3- DADOS DE PROJETO

Produção de vapor	50.000 Kg/h
Qualidade do vapor	Superaq. a 320°C
Pressão na saída do superaquecedor	24 Kgf/cm <sup>2</sup>
Combustível	óleo 2A
Temperatura da água	105°C
Temperatura do ar	25°C
Eficiência Térmica	86 %

## 4- DESCRIÇÃO DE UM GERADOR DE VAPOR

### 4.1- Introdução

Os geradores de vapor são constituídos de uma associação de componentes, de maneira a constituírem um aparelho complexo agregando equipamentos tais como superaquecedores, economizadores, pré-aquecedores de ar, captadores de fuligem, etc.

A figura 1 a seguir permite identificar os componentes clássicos e o princípio de funcionamento da instalação.

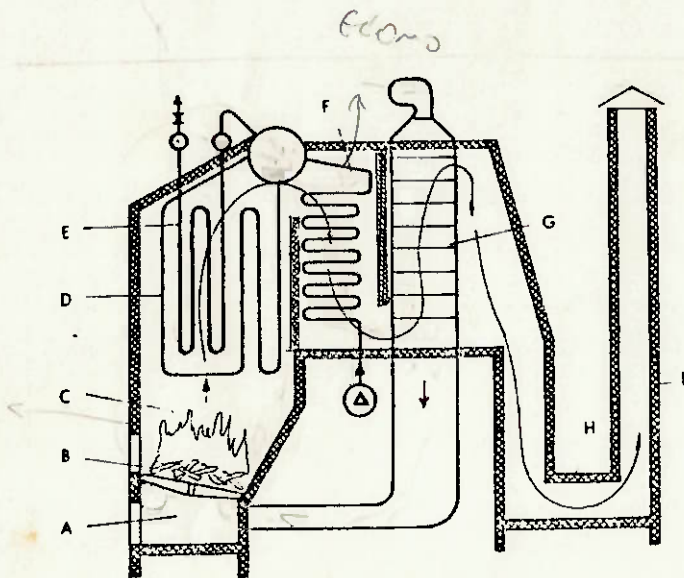


Figura 1 - Princípio de funcionamento de uma unidade complexa com fornalha para queima de óleo combustível

Os componentes clássicos são:

- A - Queimador de óleo
- B - Câmara de combustão
- C - Caldeira
- D - ~~Superaquecedor~~ -
- E - ~~Economizador~~ - SUPERaquecedor
- F - ~~Aquecedor de ar~~ - ECONOMIZADOR
- G - ~~Canal dos gases~~ - aquecedor de ar.

H - CANAL DOS GASES  
I - CHAMINÉ.

#### 4.2 Descrição do Funcionamento

Consideramos um gerador de vapor completo com economizador, pré-aquecedor de ar, superaquecedor e tiragem induzida. Descreveremos os dois circuitos que existem num gerador de vapor.

- Circuito dos fluidos gasosos

O ar frio, tendo atravessado o pré-aquecedor de ar, graças ao insuflamento por um ventilador, se aquece e se projeta na fornalha, onde reage com o combustível, assegurando a sua contínua queima.

Os gases da combustão resultante desta queima com elevada temperatura, por efeito da tiragem do sistema, circulam através de todas as partes da caldeira, tomando contato com todas as superfícies de absorção de calor, até atingirem a chaminé e serem eliminados para a atmosfera.

Neste trajeto, a maior parte do calor contido nos gases da combustão é transferida para a água:

- (a) para aquece-la no economizador
- (b) para vaporiza-la na caldeira, elevando a pressão do sistema até a pressão fixada pelo projeto
- (c) para superaquecer, no superaquecedor, o vapor saturado do sistema até a temperatura de trabalho.

#### - Circuito da água

A água é mantida em nível constante no interior da caldeira graças a sua introdução controlada mediante o trabalho de uma bomba de alimentação de água seja por controle manual ou automático, introduzindo-se no gerador o peso de água equivalente ao peso de vapor extraído.

#### - Formação de vapor

A água contida no interior da caldeira, mantida no nível de operação visível num indicador de nível, graças ao suprimento de calor gerado pela queima do combustível na fornalha, aumenta sua entalpia até atingir a ebulição com formação do vapor.

Tendo a caldeira atingido internamente a pressão de trabalho, o vapor pode ser extraído pela tomada superior existente para tal fim. À medida que se extrai o vapor, deve-se repor quantidade equivalente de água. A água pode ser alimentada à temperatura ambiente ou pré-aquecida seja pelo retorno do condensado ou pelo pré-aquecimento em economizadores.

### 4.3- Componentes clássicos

#### 4.3.1- Fornalha

##### 4.3.1.1- Definição

Fornalha é a denominação genérica que se dá para o local onde se queima o combustível. É a parte da caldeira onde ocorrem os processos mais importantes e decisivos para o satisfatório desempenho e rendimento do equipamento, por isso, deve-se alcançar a mais perfeita combustão, simultaneamente com o desenvolvimento da energia calorífica compatível com as necessidades operativas.

A fornalha é constituída por duas partes:

- aparelho da combustão, que é formado por um conjunto de componentes que oferecem as condições necessárias para a queima do óleo combustível, tais como queimadores de óleo, gás, etc.

- câmara de combustão, que é representada por um volume adequadamente dimensionado onde se desenvolve a chama e se completa a combustão.

#### 4.3.1.2- Seleção do tipo de fornalha

É um dos pontos mais importantes num projeto de um gerador de vapor. É fundamental para a obtenção de uma perfeita combustão.

A seleção se faz considerando os seguintes fatores:

- tipo de combustível (sólido, líquido ou gasoso)
- volume de combustível
- teor de umidade do combustível
- estado de divisão do combustível (pulverizado, a granel, gaseificado, etc)
- teor de cinzas
- teor de voláteis
- peso específico
- método de alimentação do combustível (manual, mecânico ou automatizado)
- limpeza da fornalha
- temperatura da fornalha
- método de injeção de ar (natural ou induzido)
- regime de operação da fornalha (intermitente ou contínuo)
- comprimento da chama
- tipo de concepção construtiva (de paredes refratárias, de paredes de água, de câmara irradiada)

#### 4.3.1.3- Aparelhos de Combustão

Queimador de óleo líquido

Devido ao fato de que o combustível líquido (óleo), nas condições e temperaturas ambientes, não queimam e só sustentam queima satisfatória se forem apoiados por condições que lhe proporcionem a continuidade do processo, utilizam-se queimadores de combustível líquido a fim de assegurar condições essenciais para manter o processo de combustão.

Os queimadores subdividem os combustíveis líquidos em minúsculas partículas, que, aquecidas pela irradiação oriunda da

própria chama e à turbulência provocada pelo ingresso de ar necessário, mantém a combustão.

Os combustíveis líquidos são queimados na câmara de combustão, sempre em suspensão, mediante a projeção da fase líquida no interior da câmara na forma pulverizada de minúsculas partículas.

A pulverização é alcançada por meio de vários processos:

(a) pela injeção simultânea de ar e de óleo nas extremidades de orifícios concêntricos. O óleo escoar por gravidade ou por impulsão de uma bomba de baixa pressão. O ar é insuflado por um ventilador, sendo o veículo responsável pela pulverização do óleo em gotículas.

(b) o mesmo princípio da anterior, porém utiliza-se vapor produzido pela própria caldeira ao invés de ar

(c) Queimador de "Copo Rotativo", cujo funcionamento baseia-se na formação de um filme de óleo no interior de um copo cônico girando a alta rotação, que projeta o combustível na forma de um anel cônico de encontro a um fluxo de ar rotativo de alta pressão. A colisão de ambos provocam simultaneamente a pulverização e a mistura do combustível com o comburente.

(d) "Queimadores de pulverização mecânica", caracterizados pela ausência completa de peças rotativas, garantindo a pulverização do óleo por escoamento estrangulado em alta velocidade através de orifícios de pequenas dimensões.

(e) "Queimadores de pulverização mecânica com ar auxiliar" Deste processo, participam dois fluidos, conduzidos em tubos concêntricos até a extremidade do bico, onde se localizam os componentes de escoamento. O óleo percorre o curso central até fluir pelo orifício de saída, com movimento rotativo e pulverizado. O ar, auxilia o processo, percorrendo o tubo externo e escoando na extremidade incidindo contra o óleo bem junto com a base do cone em formação.

(f) "Queimador sônico", cujo funcionamento é o inverso do queimador anterior. O ar ingressa pelo tubo central e escoar por um bocal divergente à velocidades supersônicas. Em frente ao bocal encontra-se um anteparo que origina ondas de choque. O óleo escoar através de pequenos orifícios num trecho do bocal divergente, é arrastado pelo fluxo de ar até sofrer subdivisão em finíssimas partículas na região da onda de choque.

(g) "Queimadores de pulverização mecânica com retorno". Constitui-se por dois tubos concêntricos, o central servindo para alimentação do óleo na câmara do bico e o externo, para retorno do combustível. O óleo é introduzido na câmara com forte movimentos rotatórios provocados pela sua passagem em canais tangenciais, escoar uma fração pelo orifício da pastilha pulverizadora e devolve o saldo para o retorno. A circulação do combustível pode ser invertida.

(h) "Queimadores com pulverização mecânica com fluido auxiliar". Constitui-se por dois tubos concêntricos para escoar o óleo pelo tubo central e o vapor (ou ar comprimido) pelo externo. Ambos os fluidos convergem para uma câmara de combustão em múltiplos jatos de finíssimas partículas. O óleo antes de ingressar na câmara de mistura, atravessa canais tangenciais que imprimem forte movimento rotatório ao fluido, o que facilita a formação da emulsão e a qualidade da pulverização.

(i) "Queimador de pulverização combinada, mecânica e a vapor". Operam com o princípio de pulverização mecânica, auxiliada por um escoamento de vapor, portanto, não se emulsiona com o óleo, mas intervem junto a saída do óleo, proporcionando uma pulverização de finíssimas partículas.

#### Queimadores de Dissociação

Estes queimadores proporcionam o desdobramento completo do combustível até as frações gaseificadas para em seguida projetá-las para o meio onde se completa a combustão. A figura a seguir esquematiza um queimador de dissociação

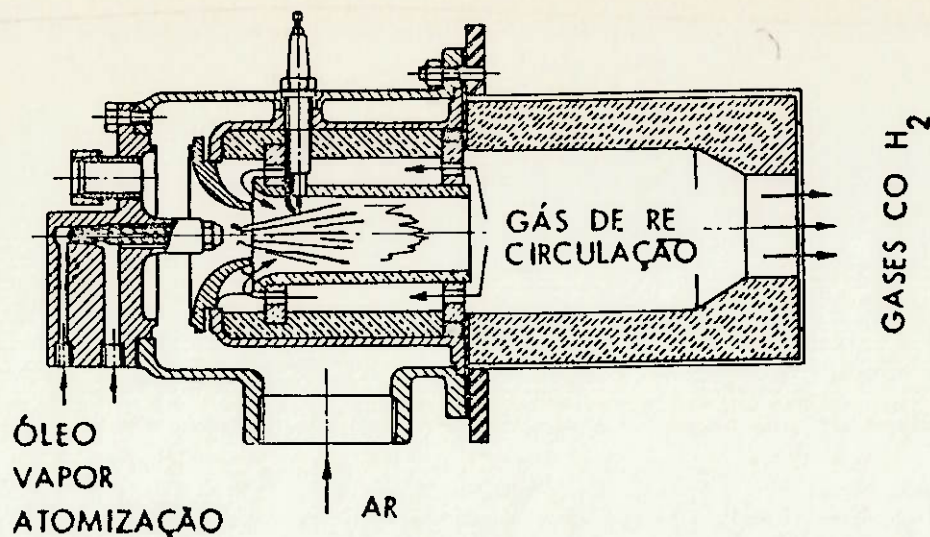


Figura 2 - Queimadores de dissociação

#### Queimadores de Emulsão

São queimadores destinados a combustão de fluidos misturados em proporções adequadas.

Existem atualmente três processos:

(a) A primeira proporsição constitue uma emulsão prévia de óleo com uma porcentagem de ar em pressão.

(b) A segunda tecnologia recorre a emulsão do mesmo combustível com determinado teor de água, ambos dosados de forma a possibilitar os resultados no aperfeicoamento da combustão.

(c) A terceira tecnologia de mistura de combustível é conhecida como C.O.M. (Coal Oil Mixture) representada por uma emulsão homogênea de óleo combustível com carvão mineral ou vegetal.

## **4.3.2- Superaquecedores**

### **4.3.2.1- Definição**

Superaquecedores são aparelhos que permitem a elevação da temperatura do vapor, mantendo-o à mesma pressão, acima da temperatura de vaporização, tornando-o superaquecido.

Constituem-se por um feixe de serpentinas soldados a coletores de entrada e saída do vapor. Estas serpentinas são atravessadas, externamente, por uma corrente de gases quentes gerados na fornalha.

### **4.3.2.2- Classificação**

Os superaquecedores são classificados em vários critérios:

- Quanto a colocação
  - dependentes, pois fazem parte do gerador de vapor
  - independentes, separados das caldeiras
- Quanto ao tipo de tubo
  - tubos inteiramente lisos
  - tubos aletados
- Quanto ao processo de absorção de calor
  - absorção de calor por irradiação
  - absorção de calor apenas por convecção
  - absorção de calor mixto
- Quanto ao sentido dos fluxos de vapor e gases
  - de corrente paralela
  - de contra-corrente

- Quanto ao número de passagem
  - de simples passagem de vapor
  - de dupla passagem
  - de múltipla passagem

#### 4.3.2.3- Localização

A posição do superaquecedor é determinada pelas condições de funcionamento. Quanto mais alta a temperatura de superaquecimento, tanto mais próximo das altas temperaturas dos gases deve ser colocado o aparelho.

#### 4.3.2.4- Dimensionamento

Os elementos que intervêm no dimensionamento dos superaquecedores são:

- (a) volume, temperatura e velocidades dos gases de combustão
- (b) velocidades do vapor no interior dos tubos
- (c) temperaturas do vapor superaquecido

A obtenção de temperatura de vapor superaquecido estável e constante é praticamente impossível. A própria oscilação na demanda de vapor interfere nas condições do processo provocando afastamento sensíveis da temperatura de cálculo.

Devido ao número de fatores que intervêm na sua variação, como:

- (a) variação na carga do gerador;
- (b) variação das características dos combustíveis;
- (c) limpeza e manutenção dos aparelhos de combustão;
- (d) variação no excesso de ar na combustão;
- (e) variação na temperatura da água de alimentação;
- (f) descarga da caldeira;
- (g) eventual abertura das válvulas de segurança;

é necessário um controle automático da temperatura. Existem vários métodos usuais para assegurar o controle automático da temperatura, porém esses métodos não são do interesse deste trabalho.

#### 4.3.3- Economizadores

##### 4.3.3.1- Definição

Economizadores são aparelhos destinados a elevar a temperatura da água de alimentação, antes de introduzi-la no interior da caldeira, aproveitando o calor sensível ainda disponível nos gases de combustão, após sua passagem pelas últimas partes da própria caldeira.

O aumento da temperatura da água de alimentação é benéfico ao processo pois atenua a queda de pressão mantendo o regime de pressão de trabalho mais estável e aumentando sua eficiência térmica.

##### 4.3.3.2- Localização

Os economizadores estão sempre localizados logo após a última superfície de convecção da caldeira. Após este aparelho segue-se o sistema de tiragem ou o pré-aquecedor de ar.

##### 4.3.3.3- Dimensionamento

Os elementos que intervêm no dimensionamento dos economizadores são:

- (a) volume, temperatura e velocidade dos gases de combustão
- (b) velocidades da água no interior dos tubos
- (c) temperatura de entrada a saída da água

Um economizador convenientemente dimensionado pode conferir 1% de eficiência térmica para cada 15.5°C que aumenta a temperatura da água de alimentação.

#### 4.3.4- Pré-aquecedor de ar

##### 4.3.4.1- Definição

Aquecedores de ar são aparelhos que elevam a temperatura do ar de combustão antes de projetá-lo na fornalha. O calor cedido ao ar provém dos gases quentes residuais que estão por sair da caldeira. Estes aparelhos reduzem a temperatura dos gases que abandonam a caldeira, melhorando o seu rendimento térmico. Além disso, promove sensível melhoria na qualidade de combustão com a diminuição do ar necessário e conseqüente aumento da temperatura interna da câmara e maior estabilidade da chama.

##### 4.3.4.2- Seleção do pré-aquecedor de ar

A seleção de um pré-aquecedor de ar deve levar em conta uma série de fatores tais como:

- (a) custo inicial do equipamento
- (b) despesas de manutenção
- (c) custos da instalação
- (d) consumo de energia
- (e) espaço disponível

##### 4.3.4.3- Dimensionamento

Seguindo o mesmo roteiro de dimensionamento dos economizadores de água, necessita-se dos seguintes elementos para cálculos:

- (a) volume, temperaturas e velocidades de água dos gases de combustão;
- (b) volume, temperaturas do ar ;

Os pré-aquecedores de ar promovem considerável economia de combustível. Para cada 100°C de queda de temperatura nos gases de combustão alcança-se 6.5 a 7.0% de aumento da eficiência no gerador de vapor.

## 5- CÁLCULOS TÉRMICOS

### 5.1- Cálculos preliminares

#### 5.1.1- Composição do combustível

O óleo combustível apresenta a seguinte composição média:

Elemento	% em peso
C .....	81.49%
H .....	11.01%
S .....	5.50%
H <sub>2</sub> O .....	2.00%
TOTAL	100.00%

#### 5.1.2- Poder calorífico inferior do combustível

Define-se como poder calorífico inferior do combustível, a quantidade de calor gerado pela unidade de massa ou de volume de um combustível (neste caso, óleo) submetido ao processo de combustão à pressão constante.

O poder calorífico inferior pode ser determinado a partir de:

$$PCI = 8100 * C + 33960 * (H - O/8) + 2214 * S - 600 * (W + 9 * H)$$

onde:

C = teor de carbono

H = teor de hidrogênio

S = teor de enxofre

O = teor de oxigênio

N = teor de nitrogênio

Z = teor de cinzas

W = teor de umidade

Substituindo os valores da tabela de composição, temos:

$$PCI = 8100 * 0.8149 + 33960 * (0.1101 - 0) + 2214 * 0.055 \\ - 600 * (0.02 + 9 * 0.1101)$$

$$PCI = 9658 \text{ Kcal/Kg}$$

### 5.1.3- Quantidade de calor útil

Quantidade de calor útil é a parcela de calor produzido pelo combustível que se transferiu para a água, formando vapor superaquecido:

$$Q_U = m * (h_S - h_E)$$

onde:

$Q_U$  = quantidade de calor cedido para a água (Kcal/h)

$h_S$  = entalpia de saída do vapor (Kcal/Kg)

$h_E$  = entalpia de entrada da água (Kcal/Kg)

$m$  = vazão em massa da água (Kg/h)

As entalpias são obtidas nas tabelas de propriedades termodinâmicas da água e do vapor d'água.

Vapor:

$$P_S = 24 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$h_S = 731.7 \text{ Kcal/Kg}$$

$$T_S = 320^\circ\text{C}$$

Água:

$$P_E = 1.23 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$h_E = 105.08 \text{ Kcal/Kg}$$

$$T_E = 105^\circ\text{C}$$

$$Q_U = 50\ 000 * (731.7 - 105.08)$$

$$Q_U = 31\ 331\ 000 \text{ Kcal/h}$$

#### 5.1.4- Consumo de combustível

O consumo de combustível é obtido pela seguinte expressão:

$$B = \frac{Q_u}{PCI * n}$$

onde:

- B = consumo de combustível (kg/h)  
PCI = poder calorífico inferior do combustível (kcal/kg)  
n = rendimento térmico do gerador de vapor

$$B = \frac{31\ 331\ 000}{9658 * 0.86}$$

$$B = 3773 \text{ kg/h}$$

#### 5.2- Cálculos da combustão

##### 5.2.1- Volume de ar teórico

Volume de ar teórico é a quantidade de ar necessário teoricamente para a combustão completa do combustível. É calculado da seguinte maneira:

$$V_{AR}^T = 8.876 * C + 3.32 * S + 26.47 * H - 3.32 * O$$

$$V_{AR}^T = 8.876 * 0.8149 + 3.32 * 0.055 + 26.47 * 0.1101$$

$$V_{AR}^T = 10.33 \text{ Nm}^3 / \text{kg comb}$$

### 5.2.2- Volume de ar teórico

Tecnicamente é impossível assegurar uma combustão completa apenas com suprimento de ar teoricamente necessário. Por isso, as reações de combustão na prática sempre se realizam com excesso de ar. A granulometria do combustível, seu estado de divisão, o sistema de injeção de ar, o próprio aparelho de combustão, intervêm, no processo de queima, de maneira a estabelecer o excesso de ar necessário:

$$V_{AR}^R = m * V_{AR}^T$$

onde:

m = excesso de ar

O valor de m para óleo combustível com queimador de pulverização mecânica é 1.2, portanto:

$$V_{AR}^R = 1.2 * 10.33$$

$$V_{AR}^R = 12.40 \text{ Nm}^3/\text{kg comb}$$

### 5.2.3- Vazão de ar necessária

A vazão de ar necessária é calculada da seguinte maneira:

$$V_{AR} = V_{AR}^R * B$$

$$V_{AR} = 12.40 * 3773$$

$$V_{AR} = 46\,786 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

#### 5.2.4- Volume teórico dos gases de combustão

É o volume dos gases desenvolvidos teoricamente para cada quilograma de combustível. É determinado pela seguinte expressão:

$$V_{oT} = 1.853 * C + 0.693 * S + 0.79 * V_{AR}T + 0.8 * N + \\ + (9 * H + W) * 1.24$$

$$V_{oT} = 1.853 * 0.8149 + 0.693 * 0.055 + 0.79 * 10.33 + \\ + (9 * 0.1101 + 0.02) * 1.24$$

$$V_{oT} = 10.962 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

#### 5.2.5- Volume real dos gases de combustão

$$V_{oR} = V_{oT} + (m - 1) * V_{AR}T$$

$$V_{oR} = 10.962 + (1.2 - 1) * 10.33$$

$$V_{oR} = 13.028 \text{ Nm}^3/\text{kg comb}$$

#### 5.2.6- Vazão dos gases de combustão

$$V_o = V_{oR} * B$$

$$V_o = 13.028 * 3773$$

$$V_o = 49\ 155 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

## 6- DIMENSIONAMENTO DA FORNALHA

### 6.1- Determinação do calor total introduzido na fornalha

O calor total corresponde ao calor liberado pela queima de combustível acrescido do calor contido no ar de combustão.

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

onde:

$$Q_T = \text{calor total} \quad (\text{kcal/h})$$

$$Q_1 = \text{calor liberado pela queima da lenha} \quad (\text{kcal/h})$$

$$Q_2 = \text{calor contido no ar de combustão} \quad (\text{kcal/h})$$

#### 6.1.1- Calor liberado pela queima da lenha

$$Q_1 = \text{PCI} * B$$

$$Q_1 = 9658 * 3773$$

$$Q_1 = 36\ 439\ 634 \text{ kcal/h}$$

#### 6.1.2- Calor contido no ar de combustão

Será utilizado um pré-aquecedor de ar de combustão. O ar entrará na câmara de combustão com a temperatura de 160°C.

$$Q_2 = V_{AR} * C_{P\ AR} * T_{AR}$$

onde:

$$Q_2 = \text{calor contido no ar de combustão} \quad (\text{kcal/h})$$

$$V_{AR} = \text{volume de ar} \quad (\text{Nm}^3/\text{h})$$

$$C_{P\ AR} = \text{calor específico do ar} \quad (\text{kcal/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$T_{AR} = \text{temperatura do ar} \quad (^\circ\text{C})$$

$$Q_2 = 46\ 786 * 0.31 * 160$$

$$Q_2 = 2\ 320\ 586\ \text{kcal/h}$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

$$Q_T = 36\ 439\ 634 + 2\ 320\ 586$$

$$Q_T = 38\ 760\ 220\ \text{kcal/h}$$

## 6.2- Volume da câmara de combustão

Para assegurar a completa queima do combustível é necessário um volume adequado ad câmara de combustão.

$$V_{cc} = \frac{Q_T}{C_v}$$

onde:

$V_{cc}$  = volume da câmara de combustão ( $m^3$ )

$Q_T$  = calor total introduzido na câmara (kcal/h)

$C_v$  = carga térmica do volume da câmara (kcal/h  $m^3$ )

Para as fornalhas de combustível líquido, normalmente utiliza-se para  $C_v$  valores entre 180 000 e 250 000 kcal/h  $m^3$

$$V_{cc} = \frac{38\ 760\ 220}{250\ 000}$$

$$V_{cc} = 155\ m^3$$

### 6.3- Dimensões da fornalha

Para a queima total do combustível a altura da câmara de combustão deve possuir 6 metros de altura, devido a formação de chama longa na combustão.

Área da fornalha

$$A = \frac{V_{cc}}{h}$$

$$A = \frac{155}{6}$$

$$A = 25.84 \text{ m}^2$$

Logo as dimensões da fornalha serão:

$$5.0 \times 5.0 \times 6 \text{ m}$$

## 7- DIMENSIONAMENTO DA CALDEIRA

### 7.1- Calor absorvido por irradiação

A transmissão de calor entre os corpos ocorre sempre que existe uma diferença de temperatura entre eles. No caso específico de que trata este trabalho participam do processo dois fluidos, o portador de calor denominado gases de combustão e o receptor de calor que pode ser água ou fluido térmico. A transferência de calor se verifica pelos três modos:

- irradiação
- convecção
- condução

No caso de caldeira com parede de água, o processo por irradiação é predominantemente na transferência de calor. Partindo-se dos seguintes dados:

- B = consumo de combustível em kg/h
- PCI = poder calorífico inferior do combustível em kcal/kg
- $V_{AR}$  = volume do ar de alimentação do combustível  $Nm^3/kg$
- $T_{AR}$  = temperatura do ar ambiente em °C
- $T_{AQ}$  = temperatura do ar aquecido em °C

determina-se o calor absorvido por irradiação pela seguinte sequência de cálculo:

- 1) Calor total  $Q_T$  na fornalha descontando as perdas na fornalha;
- 2) Superfície irradiada  $S_{IRR}$ ;
- 3) Superfície reduzida  $S_R$ ;
- 4) Temperatura de equilíbrio  $T_E$ ;
- 5) Conteúdo térmico específico residual dos gases de combustão  $h_R$ ;
- 6) Calor residual  $Q_R$ ;
- 7) Calor absorvido por irradiação  $Q_{IRR}$ ;

8) Verificação da margem de erro:

### 7.1.1- Calor total da fornalha

Do item 6.1 temos:

$$Q_T = 38\ 760\ 220\ \text{kcal/h}$$

### 7.1.2- Superfície irradiada

A superfície irradiada corresponde à projeção ortogonal da superfície de aquecimento exposta à irradiação, pode ser calculada como:

$$S_{IRR} = S_1 * \theta_1 + S_2 * \theta_2 + S_3 * \theta_3 + 2 * S_4 * \theta_4$$

onde:

$$S_1 = \text{área da parede frontal} = 24.5\ \text{m}^2$$

$$S_2 = \text{área da parede do fundo} = 34.3\ \text{m}^2$$

$$S_3 = \text{área do teto} = 24\ \text{m}^2$$

$$S_4 = \text{área da superfície lateral} = 29.4\ \text{m}^2$$

$$\theta = \text{fatores de distribuição dos tubos}$$

Usando-se tubos aletados, temos:

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 1.0\ (\text{vide ábaco 1})$$

$$S_{IRR} = 24.5 * 1.0 + 34.3 * 1.0 + 24 * 1.0 + 2 * 29.4 * 1.0$$

$$S_{IRR} = 141.6\ \text{m}^2$$

### 7.1.3- Superfície reduzida

$$S_R = \frac{1\ 000 * C_I * S_{IRR}}{4 * V_G}$$

onde:

$S_R$  = superfície reduzida

$C_I$  = constante de irradiação

Do ábaco 2, tem-se que  $C_I = 4.5$

$$S_R = \frac{1\ 000 * 4.5 * 141.6}{4 * 49\ 155}$$

$$S_R = 3.5\ m^2$$

### 7.1.4- Cálculo da temperatura de equilíbrio

A temperatura de equilíbrio corresponde à temperatura dos gases ao saírem da fornalha para as partes posteriores do gerador. Seu cálculo preciso é extremamente complexo na prática é obtido por tentativas.

$$h_g = \frac{Q_T}{V_G}$$

onde:

$$h_g = \frac{38\ 760\ 220}{49\ 155}$$

$$h_g = 785\ kcal/Nm^3$$

Com os valores:

$$m = 1.2$$

$$PCI = 9658 \text{ kcal/kg}$$

$$S_R = 3.5 \text{ m}^3$$

$$h_R = 785 \text{ kcal/Nm}^3$$

Do ábaco 3, temos:

$$T_R = 1060 \text{ }^\circ\text{C}$$

#### 7.1.5- Entalpia dos gases após a câmara de combustão

Com:

$$T_R = 1060 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$PCI = 9658 \text{ kcal/kg}$$

$$m = 1.2$$

obtem-se, do ábaco 4, a entalpia dos gases após a câmara de combustão:

$$h_R = 392 \text{ kcal/Nm}^3$$

#### 7.1.6- Calor residual

$$Q_R = h_R * V_G$$

$$Q_R = 392 * 49 \ 155$$

$$Q_R = 19 \ 268 \ 760 \text{ kcal/h}$$

### 7.1.7- Calor absorvido na fornalha por irradiação

$$Q_{IRR} = Q_T - Q_R$$

$$Q_{IRR} = 38\ 760 - 19\ 268\ 760$$

$$Q_{IRR} = 19\ 491\ 460\ \text{kcal/kg}$$

### 7.1.8- Verificação da margem de erros

Como o valor de  $T_R$  é calculado pelo método prático, é preciso verificar se o  $Q_{IRR}$  obtido não difere muito do valor real. A verificação consiste em comparar  $Q_{IRR}$  calculado pela equação de Stefan-Boltzmann. O valor de  $T_R$  é aceitável se a discrepância for menor que 2%.

$$Q_{IRR} = C_I * S_{IRR} * \left[ \frac{T_R}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_P}{100} \right]^4$$

Adotando

$$T_P = T_V + 3^\circ\text{C}$$

onde:

$T_P$  = temperatura da parede do tubo ( $^\circ\text{C}$ )

$T_V$  = temperatura de vaporização da água ( $^\circ\text{C}$ )

$$T_V = 320^\circ\text{C}$$

$$\text{logo, } T_P = 323^\circ\text{C} = 596\ \text{K}$$

$$T_R = 1060^\circ\text{C} = 1333\ \text{K}$$

$$Q_{IRR} = 19\ 314\ 527\ \text{kcal/h}$$

$$\text{discrepância} = \frac{19\ 491\ 460 - 19\ 314\ 527}{19\ 491\ 460}$$

$$\text{discrepância} = 0.9\%$$

Como a discrepância é igual a 0.9% o valor de 1060°C é satisfatório para considerar-se como temperatura real de combustão.

### 7.2- Calor fornecido ao feixe de tubos ( $Q_F$ )

Como o calor de vaporização  $Q_U$  é igual a 31 331 000 kcal/h e o calor absorvido por irradiação  $Q_{IRR}$  é igual a 19 314 527 kcal/h temos que:

$$Q_F = Q_U - Q_{IRR}$$

$$Q_F = 31\ 331\ 000 - 19\ 314\ 527$$

$$Q_F = 12\ 016\ 473\ \text{kcal/h}$$

### 7.3- Calor fornecido ao economizador ( $Q_{EC}$ )

Temperatura da água na entrada do economizador = 25°C

Temperatura da água na saída do economizador = 105°C

Das tabelas de propriedades termodinâmicas da água, tem-se:

$h_e$  = Entalpia da água na entrada = 25.02 kcal/kg

$h_s$  = Entalpia da água na saída = 105.08 kcal/kg

$$Q_{EC} = m * (h_s - h_e)$$

$$Q_{EC} = 50\ 000 * (105.08 - 25.02)$$

$$Q_{EC} = 4\ 003\ 000\ \text{kcal/h}$$

7.4- Calor fornecido ao pré-aquecedor de ar ( $Q_{par}$ )

$$Q_{par} = V_{ar} * C_{p, ar} * T_{ar}$$

$$Q_{par} = 46\ 786 * 0.31 * (160-25)$$

$$Q_{par} = 1\ 957\ 995\ \text{kcal/h}$$

7.5- Saldo de calor para a chaminé

$$Q_{ch} = Q_T - (Q_U + Q_{par})$$

$$Q_{ch} = 1\ 468\ 225\ \text{kcal/h}$$

## 7.6- Balanço térmico

	Quantidade de calor (kcal/h)	Temperatura (°C)
Calor total	38 760 220	1060
Calor absorvido por irradiação na fornalha	19 491 460	
Calor residual após a câmara	19 268 760	1060
Calor absorvido no feixe	12 016 473	
Saldo de calor após o feixe	7 252 287	450
Calor fornecido ao economizador	4 003 000	
Calor fornecido ao pré-aquecedor	1 957 995	200
Calor para a chaminé	1 468 225	90

## 7.7- Determinação das temperaturas

### 7.7.1- Temperatura de saída do feixe

Para se determinar a temperatura, primeiro calcula-se a entalpia como a razão entre o calor e a vazão dos gases de combustão. Com a entalpia, entra-se no ábaco 4 e obtém-se a temperatura.

$$h = \frac{Q_b}{V_g}$$

$$h = \frac{7\ 252\ 287}{49\ 155}$$

$$h = 148\ \text{kcal/Nm}^3$$

Do ábaco 4, temos:

$$T = 430\ ^\circ\text{C}$$

### 7.7.2- Temperatura de saída do economizador

$$h = \frac{3\ 249\ 287}{49\ 155}$$

$$h = 67\ \text{kcal/Nm}^3$$

Do ábaco 4, obtém-se:

$$T = 200\ ^\circ\text{C}$$

### 7.7.3- Temperatura de saída da chaminé

$$h = \frac{Q_{ch}}{V_g}$$

$$h = \frac{1\ 468\ 225}{49\ 155}$$

$$h = 30\ \text{kcal/Nm}^3$$

Do ábaco 4, obtém-se:

$$T_{ch} = 90\ ^\circ\text{C}$$

### 7.8- Determinação do feixe de convecção

#### 7.8.1- Área de escoamento antes do feixe

$$S = 5.0 * 5.0 * 0.39$$

$$S = 9.75\ \text{m}^2$$

#### 7.8.2- Velocidade dos gases antes do feixe

$$v = \frac{49\ 155}{3600}$$

$$v = 1.4\ \text{m/s}$$

### 7.8.3- Velocidade dos gases de combustão

A velocidade dos gases é calculada da seguinte maneira:

$$V_o = \frac{v * S_n}{S_n - d}$$

onde:

v = velocidade dos gases antes do feixe (m/s)

S<sub>n</sub> = passo normal (m)

d = diâmetro dos tubos (m)

As dimensões acima são obtidas através do arranjo de tubos

$$V_o = 2.7 \text{ m/s}$$

### 7.8.4- Temperatura de entrada e saída do feixe

$$T_m = \frac{430 + 1060}{2}$$

$$T_m = 745 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 7.8.5- Coeficiente de transferência de calor externo ao tubo

$$h_o = f_m * f_b * \alpha * z * G$$

onde:

h<sub>o</sub> = coeficiente de transferência de calor (kcal/m<sup>2</sup>h<sup>o</sup>C)

f<sub>m</sub> = fator conforme geometria

f<sub>b</sub> = fator conforme número de fileiras

x = fator conforme temperatura (kcal/t°C)

z = fator conforme umidade

G = velocidade de massa (kg/m<sup>2</sup>h)

- Cálculo de G \* D

$$G = v * p * d$$

$$G = 2.7 * 0.4 * 3600$$

$$G = 3890 \text{ kg/m}^2\text{h}$$

$$G * D = 3890 * 0.076 * 10^{-3}$$

$$G * D = 0.3 \text{ t/mh}$$

Do ábaco 5, temos  $Re = 2000$

Do ábaco 6, temos  $x = 5.5 \text{ kcal/t}^\circ\text{C}$

Do ábaco 7, temos  $f_a = 1.205$

Do tabela 1, temos  $f_b = 1.0$

Do ábaco 8, temos  $z = 0.935$

$$h_w = 1.205 * 1.0 * 5.5 * 0.935 * 3.89$$

#### 7.8.6- Coeficiente global de transferência de calor

O coeficiente global de transferência de calor engloba três parcelas: o coeficiente de convecção lado gás, o coeficiente de convecção lado água e a condução através do tubo.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_w} + \frac{1}{h_i} + \frac{e}{\lambda}}$$

onde:

$h_i$  = coeficiente de transferência de calor ( $\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ )

$\lambda$  = condutibilidade térmica ( $\text{kcal/m}^\circ\text{Ch}$ )

$e$  = espessura do tubo (m)

utilizou-se os seguintes valores:

$h_i = 5000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$

$e = 3 \text{ mm}$

$\lambda = 40 \text{ kcal/m}^\circ\text{Ch}$

$U = 24 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$

#### 7.8.7- Diferença térmica logarítmica (DMLT)

$$T_m = \frac{T_{e} - T_{sf}}{\ln ( T_{e} - T_m ) / ( T_{sf} - T_m )}$$

onde:

$T_e$  = Temperatura de entrada do feixe =  $1060^\circ\text{C}$

$T_{sf}$  = Temperatura de saída do feixe =  $430^\circ\text{C}$

$T_m$  = Temperatura da água a pressão de projeto =  $220.6^\circ\text{C}$

$$T_m = 453.5^\circ\text{C}$$

#### 7.8.8- Área de troca de calor

$$A = \frac{Q_p}{U * T_m}$$

$$A = 1104 \text{ m}^2$$

7.8.9- Superfície média de um tubo de convecção

$$S_m = \pi * D * l$$

sendo:

$$D = 0,076 \text{ m}$$

$$l = 5 \text{ m}$$

$$S_m = 1,19 \text{ m}^2$$

7.8.10- Número total de tubos do feixe

$$\text{Num. tubos} = \frac{\text{área de troca de calor}}{\text{área de cada tubo}}$$

$$\text{Num. tubos} = 928$$

## 8- PERDAS DE CALOR

### 8.1- Definição

São as parcelas de calor do combustível alimentado na fornalha não provenientes na produção de vapor.

As perdas são provenientes de duas origens: perdas ocasionais, decorrentes da má operação ou deficiência de projeto ou de equipamento e, perdas normais, constante de cada gerador, pré-fixadas pelo projeto fazendo parte da operação do equipamento.

### 8.2- Determinação das Perdas de Calor

#### - Perdas nas cinzas

São provenientes do calor do próprio combustível caído no cinzeiro e do calor sensível da própria cinza. Admite-se, a favor da segurança, igual a 1% do calor total.

#### - Perdas devidas a combustão incompleta

São representadas pela fuligem arrastada através de toda caldeira até a chaminé e pelos gases CO e H<sub>2</sub> que se desprendem na chaminé. Admite-se a, favor da segurança, igual a 3% do calor total.

#### - Perdas por irradiação

Correspondem ao calor do combustível dissipado pelas paredes do gerador de vapor. Para paredes de água admite-se igual a 1% do calor total.

#### - Perdas por calor sensível na chaminé

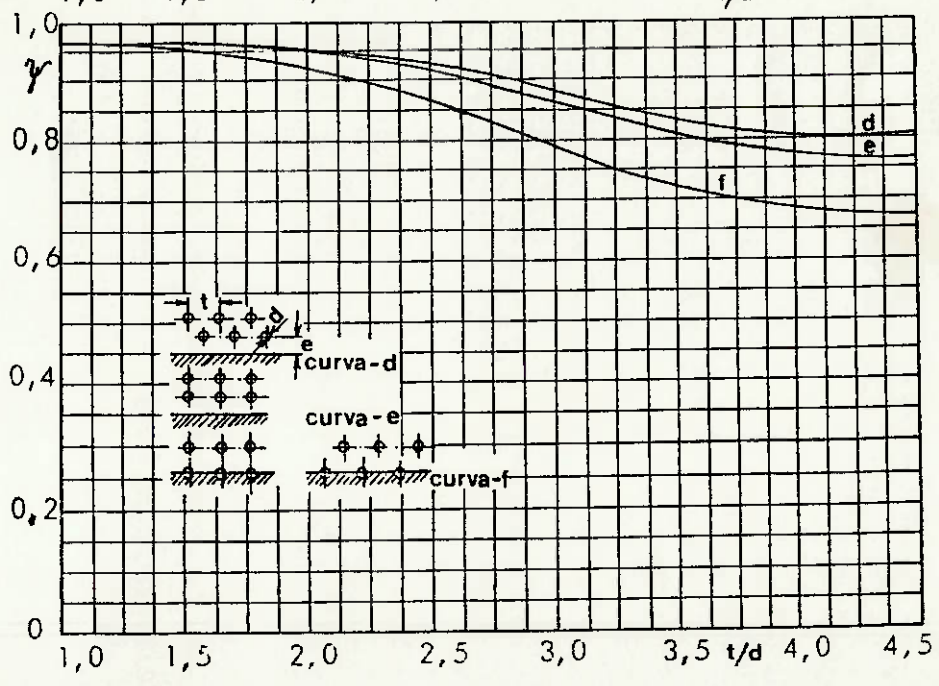
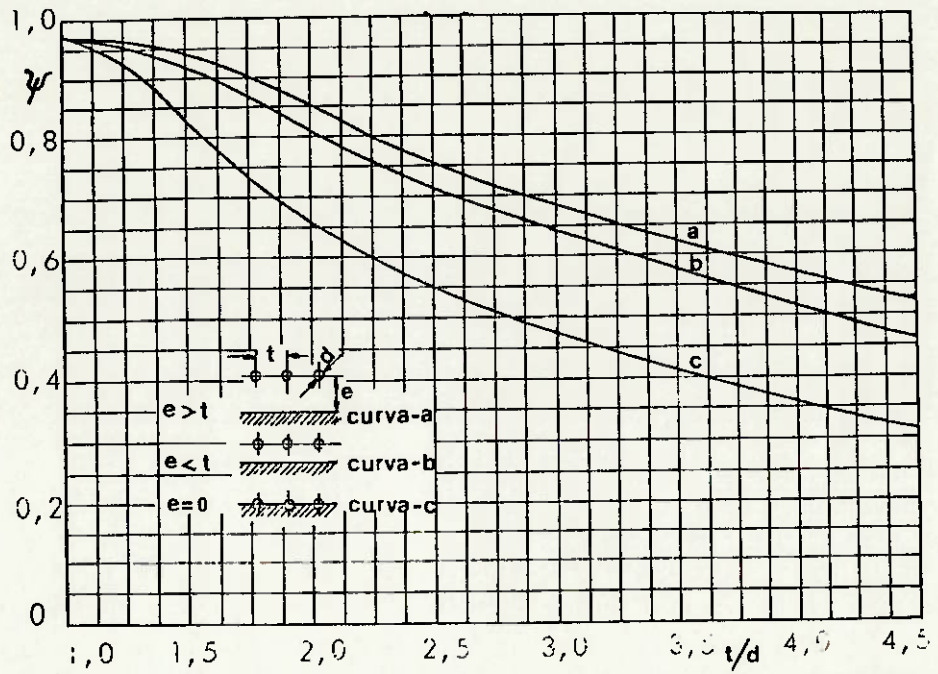
É o calor sensível dos gases de combustão que saem para a atmosfera.

## BIBLIOGRAFIA

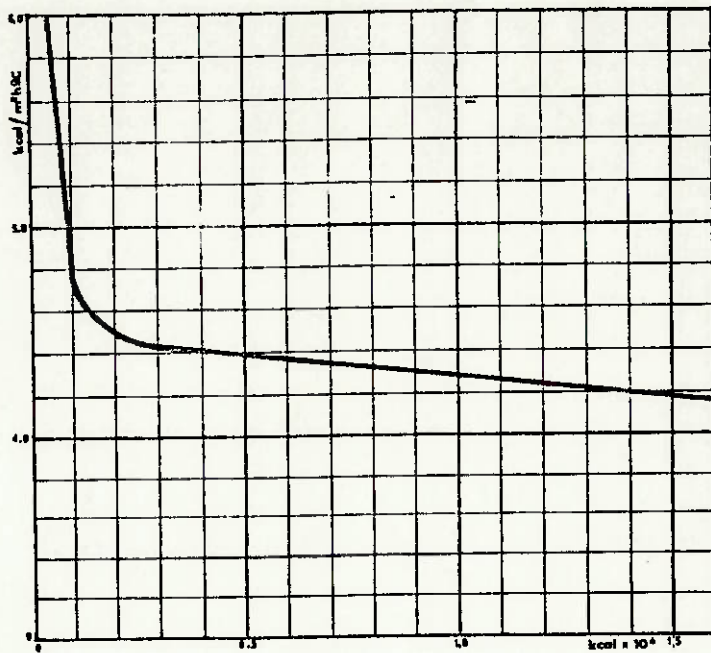
- Pera, Hildo - Geradores de Vapor de Água (Caldeiras).  
São Paulo, EPUSP, Departamento de Engenharia  
Mecânica.
- Shield, Carl D. - Caldeiras: tipos, características y sus  
funciones - Barcelona, Compania Editorial  
Continental S/A.
- Holman, Jack Philip - Transferência de Calor. São Paulo,  
Editora Mc Graw-Hill do Brasil Ltda.
- Van Wylen, Gordon J. e Sonntag, Richard E. - São Paulo,  
Editora Edgard Blucher Ltda, 2ª Edição.
- Silva, Remy Benedicto - Gerador de vapor de água.  
São Paulo, EPUSP.
- Ravaglia, Ennio - Projeto de uma caldeira. São Paulo,  
Depto. de Publicações do C.A. da E.E.  
Mauá.
- Silva, Remy Benedicto - Manual de Termodinâmica e  
Transferência de Calor. São Paulo,  
6ª Edição, Grêmio Politécnico.

ANEXOS

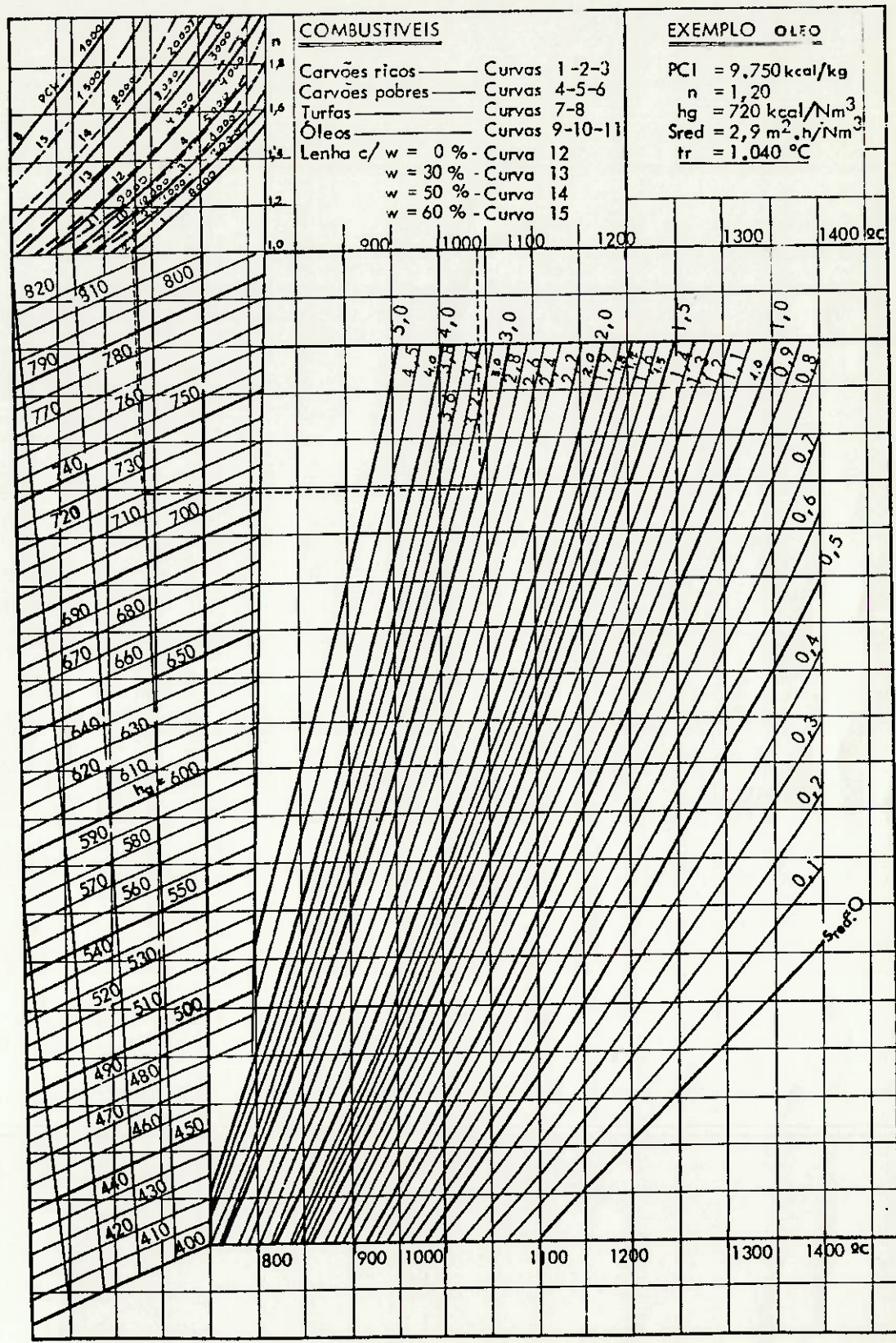
Ábaco 1  
 Determinação do Fator de Distribuição  $\gamma$  nas Paredes das Câmaras de Combustão



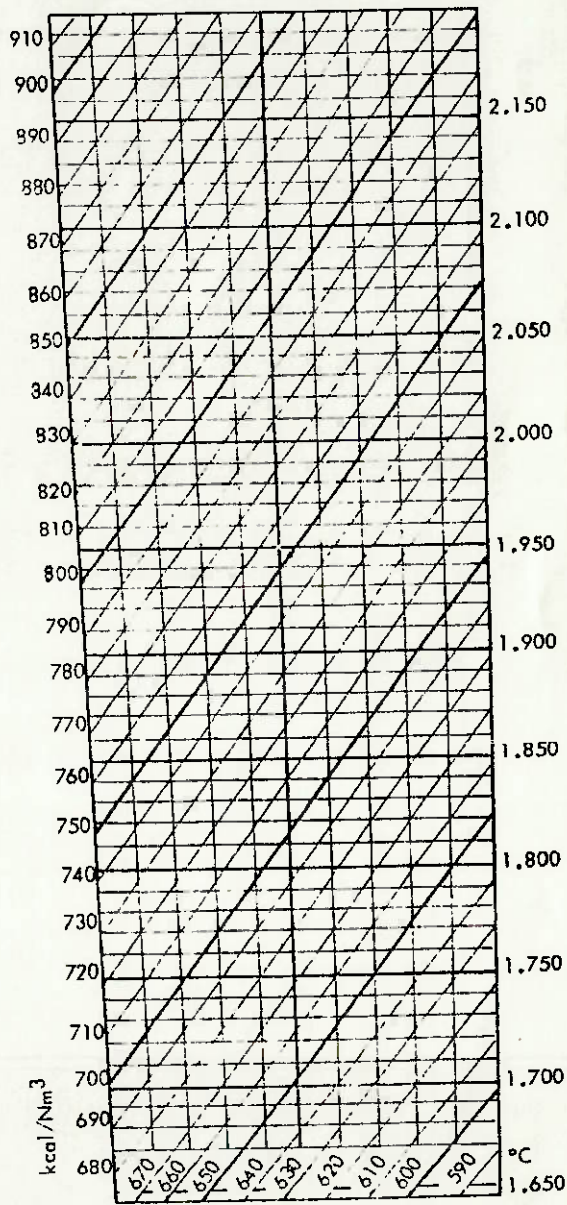
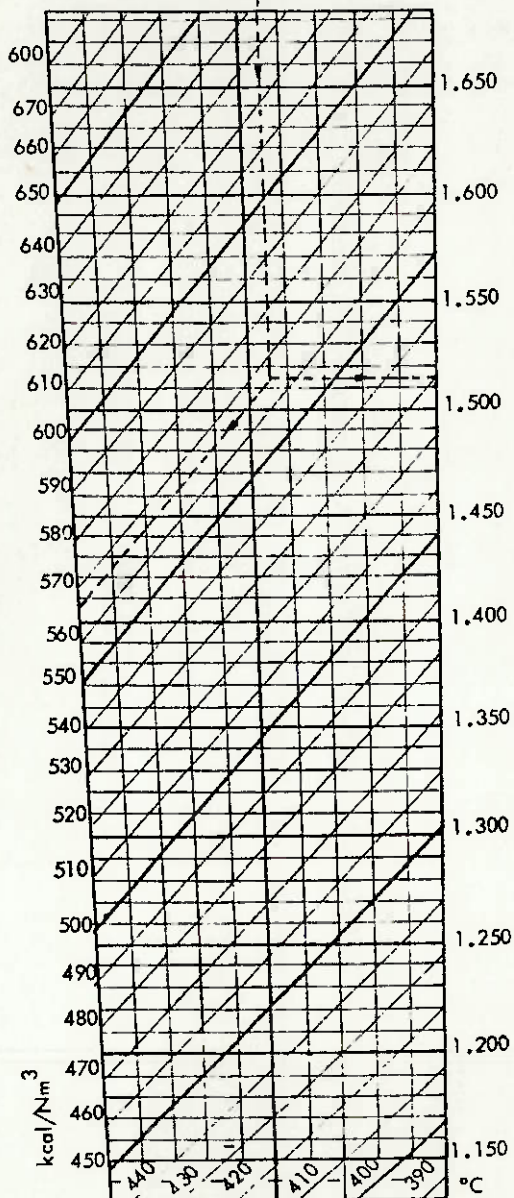
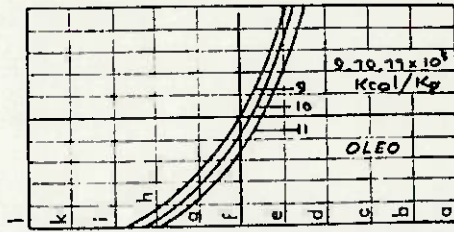
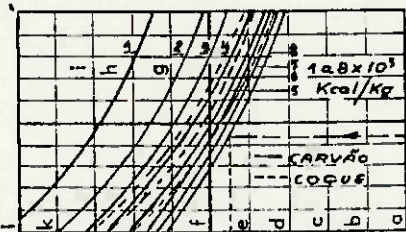
Abaco 2  
Determinação da Constante de Irradiação de Chamas de óleo  
Combustível em Função da Carga Térmica na Fornalha



Abaco 3  
 Determinação da Temperatura Remanescente

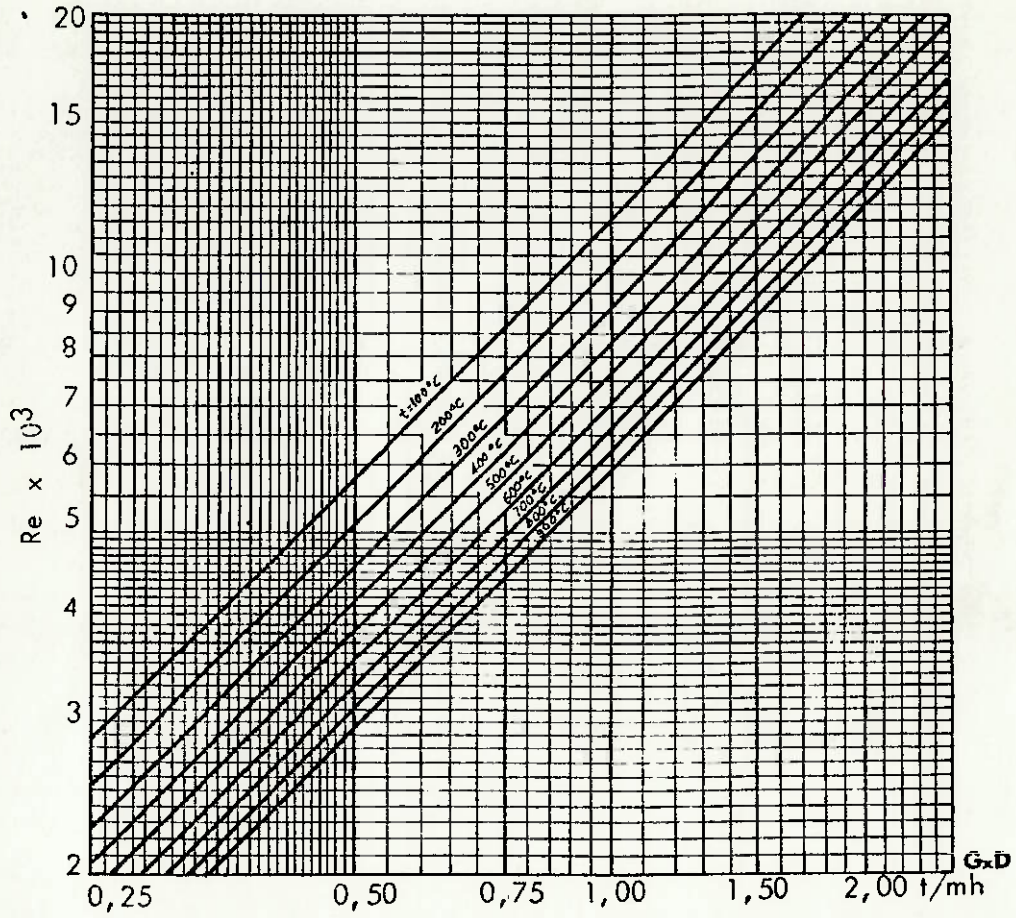


Abaco 4  
 Entalpia dos Gases em Kcal/m<sup>3</sup>h°C

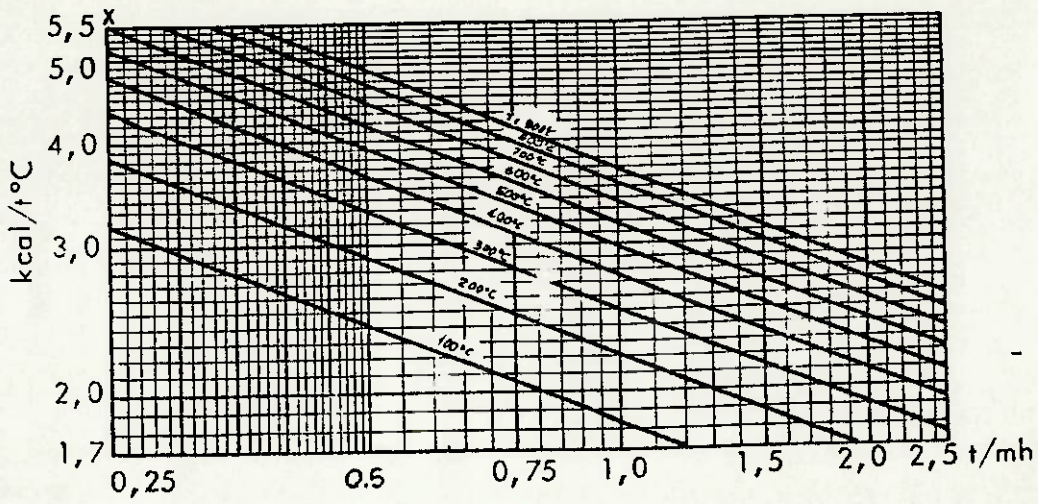


Ábaco 5

Número de Reynolds em Função do Produto  $G \times D$  e da Temperatura



Abaco 6  
Fator X



Abaco 7  
Fator  $f_a$

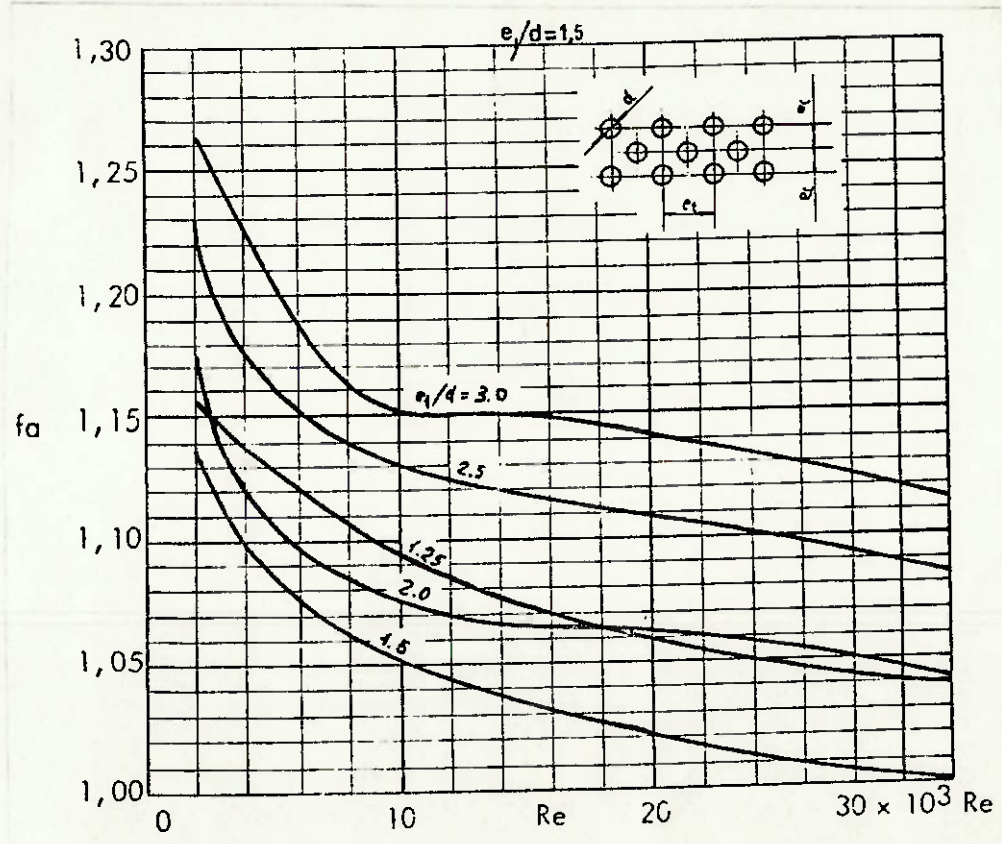
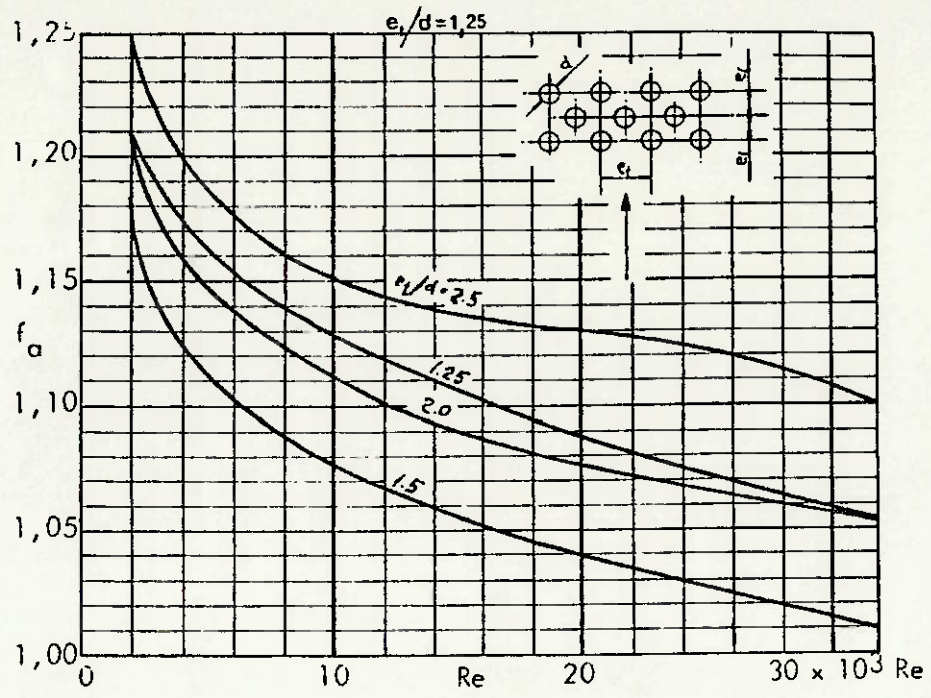


Tabela 1  
Fator de Disposição

Nº de Fileiras	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_b$	0,7	0,82	0,87	0,91	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99

Abaco 8  
Fator Z

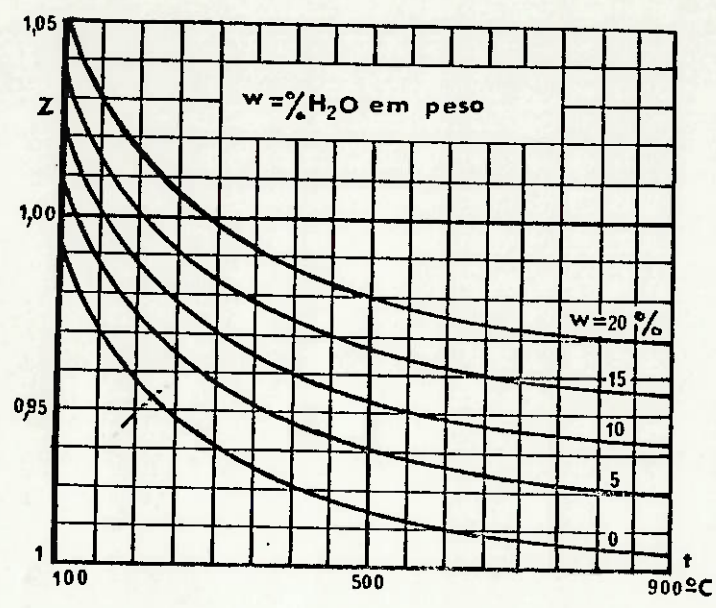


Tabela 2  
 Condutibilidade Térmica de Materiais

Materiais	$\lambda$ em kcal/m °C.h a t °C						
	0	100	200	300	400	600	800
Aço carbono	40	40	39	36	33	30	-
Ferro fundido	43	42	40	37	35	30	-
Alumínio	197	197	197	198	200	-	-
Tijolo refratário	0,75	0,79	0,83	0,86	0,90	0,98	1,06
Tijolo refr. isolante	0,075	0,085	0,094	0,103	0,112	0,129	0,148
Lã de rocha	0,028	0,040	0,053	0,066	-	-	-
Lã de vidro	0,030	0,044	0,063	0,090	-	-	-
Amianto	0,095	0,102	-	-	-	-	-
Vermicolite	0,048	-	-	-	-	-	-