

CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO  
DE CALOR SENSÍVEL  
NA INDÚSTRIA CERÂMICA.

## FICHA CATALOGRÁFICA

---

Oliveira, Carlos Alberto de

Caldeira de recuperação de calor sensível  
na indústria cerâmica; orientador Prof. Hil-  
do Pera. São Paulo, EPUSP, 1982.

Bibliografia: pg. 40

Caldeiras de Recuperação \_\_\_\_\_

Sys 2128619

iii

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Projeto Mecânico

CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO  
DE CALOR SENSÍVEL NA  
INDÚSTRIA CERÂMICA.

Autor Carlos Alberto de Oliveira  
Orientador Eng. Hildo Pera

## SUMÁRIO

O objetivo que tentamos atingir ao iniciar este trabalho foi o de traçar as linhas básicas do projeto de um equipamento capaz de produzir vapor a partir da recuperação do calor sensível dos gases produzidos pela queima de combustível em determinados fornos. Para isto, o trabalho foi dividido em duas partes: na primeira foram enfocados aspectos teóricos com os quais se pretende esclarecer os interessados na recuperação de calor, particularmente na indústria cerâmica; na segunda parte enfocou-se aspectos essencialmente práticos e relativos a cálculos.

A primeira parte do trabalho inicia-se com o capítulo 1, o qual contém a explanação de alguns aspectos econômicos - que incentivam a recuperação de calor. O capítulo 2 trata da indústria cerâmica e das possibilidades de se recuperar calor neste campo, que é o que este projeto pretende realizar. O capítulo 3 focaliza as caldeiras de recuperação principalmente - quanto aos tipos e métodos de limpeza; não houve, neste capítulo, a preocupação de se elaborar formalizações matemáticas.

O capítulo 4 inicia a segunda parte deste trabalho, e enfoca os cálculos térmicos e os dimensionamentos que decorrem destes cálculos. O capítulo 5 trata dos cálculos mecânicos da caldeira, isto é, aqueles relativos aos elementos que devem resistir a esforços. Finalmente, o capítulo 6 cuida das precauções que devem ser tomadas quanto aos aspectos construtivos - das caldeiras.

Ao final do volume há uma relação das referências bibliográficas que foram consultadas para a realização deste trabalho. As figuras referidas no decorrer do texto encontram-se em anexo, logo após a bibliografia. Neste anexo pode-se ver também a concepção geral do projeto elaborado.

## C O N T E Ú D O

## PARTE "A" - Base Teórica

Capítulo 1. Introdução .....	1
Capítulo 2. A Indústria Cerâmica	
2.1. Produtos e Processos .....	2
2.2. Recuperação de Calor em Instalação de Vapor ....	2
2.3. Recuperação de Calor na Indústria de Produtos Ce- râmicos Finos .....	3
2.3.1. Recuperação de Calor a partir do Res- friamento dos produtos .....	4
2.3.2. Recuperação de Calor a partir dos Ga- ses de Combustão .....	5
Capítulo 3. Caldeiras de Recuperação	
3.1. Introdução .....	7
3.2. A Recuperação de Calor .....	8
3.3. Descrição dos principais tipos de Caldeiras de Recuperação .....	10
3.3.1. Caldeiras de Tubos de Fumaça .....	10
3.3.2. Caldeiras de Tubos de Água .....	11
3.4. Limpeza das Caldeiras .....	12
3.4.1. Caldeiras de Tubos de Fumaça .....	13
3.4.1.1. Método Manual .....	13
3.4.1.2. Método Mecânico .....	13
3.4.1.3. Método Químico .....	14
3.5. Considerações de Projeto .....	14

## PARTE "B" - Projeto

Capítulo 4. Cálculos Térmicos	
4.1. Introdução .....	18
4.2. Volume dos gases na saída do forno de cozimento.	18
4.3. Composição do gás em Volume .....	20
4.4. Características do vapor .....	20

4.5. Temperaturas .....	21
4.6. Calor Disponível .....	21
4.6.1. Cálculo do calor específico médio da mistura de gases .....	21
4.6.2. Calor de Recuperação .....	24
4.7. Cálculo da Descarga de Vapor .....	24
4.8. Escolha do Tipo de Caldeira .....	24
4.9. Escolha dos Tubos Utilizados .....	25
4.10. Dimensionamento da Caldeira .....	27
4.11. Cálculo da Válvula principal de saída de vapor.	30
4.12. Cálculo do Volume da Câmara de Vapor .....	31
4.12.1. Volume teórico mínimo da Câmara de vapor .....	31
4.12.2. Volume real da Câmara de vapor .....	32
Capítulo 5. Cálculos Mecânicos	
5.1. Introdução .....	34
5.2. Cálculo da espessura da parede do tambor .....	34
5.3. Cálculo da espessura dos fundos planos .....	36
Capítulo 6. Parte Construtiva .....	38
Bibliografia .....	40
Anexo .....	42

PARTE "A":

Base Teórica

# 1

## Introdução

A necessidade atual da indústria brasileira é reduzir seus custos para prevenir a inflação e sustentar a expansão de nosso mercado externo. Devido à concorrência de outras nações industrializadas, o mercado atual favorece o comprador, e o fator determinante para este comprador é o preço. O governo tem insistido em que devemos aumentar o volume de nossas exportações, e um fator de influência no preço final dos produtos é o preço dos combustíveis. Como o controle do preço destes combustíveis está nas mãos dos países produtores, a linha lógica a ser atacada é o uso racional do combustível.

Considerando-se a queima de combustíveis para utilização em processos industriais, temos que da quantidade total de calor de um gás de combustão, apenas a fração entre a temperatura de combustão e a temperatura na qual o gás deixa a caldeira principal ou o forno é que é disponível para o primeiro processo de aquecimento. O calor contido no gás de temperatura a baixo da temperatura de saída é dito calor perdido. Entretanto parte deste calor perdido pode ser utilizada, ou por retorno ao processo primário, ou por sua recuperação num processo secundário, isto é, numa caldeira de recuperação de calor perdido (a explicação detalhada sobre o que vem a ser uma caldeira de recuperação será vista em capítulo posterior).

Tendo em vista estas considerações, este trabalho propõe-se a focar o projeto de uma caldeira para recuperar parte do calor perdido no processo de cozimento de produtos da indústria cerâmica. No caso, escolhemos os produtos de cerâmica fina, e, especificamente, artigos sanitários.

## 2

# A Indústria Cerâmica

## 2.1. Produtos e Processos:

A indústria cerâmica cobre um largo campo de produtos, o qual pode ser subdividido em:

- (a) produtos derivados da argila: tijolos, telhas, manilhas, etc
- (b) produtos refratários
- (c) produtos de cerâmica fina: porcelana, azulejos, produtos e létricos, produtos sanitários, etc.

De um modo geral, o processo envolvido na produção de produtos cerâmicos consta da preparação do material, operações de forma, secagem e cozimento. Os produtos de cerâmica fina - comumente sofrem um processo posterior de vitrificação e, para alguns produtos, também de decoração, com outras operações de cozimento após cada processo. A linha de produção compreende, portanto: maquinário (alimentados por caldeiras e geradores de vapor ou por motores elétricos supridos pela rede elétrica), - secadores e fornos.

## 2.2. Recuperação de Calor em Instalação de Vapor:

Embora a recuperação de calor na indústria cerâmica seja praticada principalmente em fornos, as instalações de vapor devem ser mencionadas por serem utilizadas em muitas fábricas na produção de energia e/ou secagem de produtos. As caldeiras empregadas são quase todas do tipo carcaça e tubos, seja Cornish, Lancashire ou Economic. Os métodos de recuperação de calor aplicados incluem (1) pré-aquecimento da água de alimentação através de um economizador, (2) retorno do condensado à caldeira, e (3) utilização do vapor de escape.

Os economizadores são usados com caldeiras Lancashire

apenas num pequeno número de fábricas, particularmente naquelas em que se produz energia e em que o tempo de operação e - descarga do vapor seja suficientemente grande para que sua instalação se faça de maneira econômica. Nas indústrias de louça onde o vapor não é utilizado para gerar energia, sendo usado - para o aquecimento da indústria e para a secagem de produtos, o retorno total do condensado por meio de um sistema de vácuo pode ser adotado; entretanto, nas instalações em que o vapor é insuflado por baixo do piso do recinto de secagem, como ocorre para alguns produtos da indústria de refratários, a captação e o retorno do condensado são impraticáveis. Isto é possível, entretanto, onde os recintos ou secadores são aquecidos com tubos de vapor. Onde a energia é gerada através de vapor, o vapor de escape é usado para a secagem dos produtos. Dever-se-ia fazer o uso total do vapor de escape; isto pode ser conseguido através de um balanço energia/processo, no qual qualquer diferença seria compensada por eletricidade obtida da rede elétrica.

Para alguns tipos de trabalho envolvendo o cozimento - de certos tipos de produtos da cerâmica fina, os gases de escape dos fornos são usados para gerar vapor numa caldeira de calor perdido. A provisão horária de vapor fornecida por esta fonte, embora seja pequena, é contínua. Quando este fornecimento é suficiente para suprir as necessidades de aquecimento da fábrica durante a noite, permitindo assim que a caldeira - principal seja desativada, uma economia apreciável de combustível pode ser conseguida. Utilizando-se tal sistema, entretanto, não se poderia permitir sua interferência (causada pela demand) na operação ou eficiência do forno.

### 2.3. Recuperação de Calor na Indústria de Produtos Cerâmicos

Finos:

A recuperação de calor a partir dos tradicionais fornos intermitentes usados na indústria de cerâmica fina não tem

sido praticada, talvez por causa do custo e da natureza delicada dos produtos, dos programas de aquecimento e resfriamento - que devem ser cuidadosamente controlados, ou da forma dos fornos.

No caso dos fornos contínuos, costuma-se proceder recuperação de calor a partir de fornos grandes que fazem cozimento, mas não a partir de fornos menores ou de fornos de decoração ou esmaltagem, os quais são geralmente supridos por eletricidade. Os fornos pequenos apresentam uma quantidade horária de calor pequena demais para que sua recuperação possa ser economicamente viável.

Há duas fontes a partir das quais se pode recuperar calor: o resfriamento dos produtos e os gases de combustão produzidos a partir dos fornos.

### 2.3.1. Recuperação de Calor a partir do Resfriamento dos Produtos:

Nos fornos contínuos, os artigos cerâmicos podem ser resfriados direta ou indiretamente. No primeiro caso, o ar é insuflado na saída diante do produto, e é retirado por meio de um ventilador colocado imediatamente antes da zona de cozimento. No segundo caso, o ar passa através de uma parede falsa - da zona de resfriamento, movido por meio de ventilador. O ar quente assim obtido pode ser utilizado dentro dos fornos como ar primário ou secundário para os queimadores, pode ser utilizado externamente ao forno para aquecimento da fábrica e secagem dos produtos, ou pode ser liberado para a atmosfera.

O ar quente é largamente utilizado para o aquecimento de ambientes, mas também pode auxiliar na secagem, por exemplo nas instalações em que se utilizam os tradicionais secadores lentos (como em instalações onde se produz artigos sanitários), os quais necessitam de aquecimento contínuo, incluindo o período noturno. Nas instalações em que o ar quente é utilizado para o aquecimento de ambientes, deve-se tomar o cuidado necessário

rio para que este ar não contenha gases de combustão dos fornos, o que poderia afetar os operários.

### 2.3.2. Recuperação de Calor a partir dos Gases de Combustão:

Pe

queno uso pode ser feito dos gases de combustão de fornos contínuos com aquecimento direto, isto por causa de sua baixa temperatura (100 a 200° C). Entretanto, há fornos (como os de cozimento de artigos sanitários) em que a temperatura de saída dos gases atinge valores bem mais elevados, em torno de 400 a 450° C. Conseqüentemente, tem sido possível gerar vapor a partir destes gases numa caldeira dita caldeira de recuperação de calor perdido. Para que tal sistema seja eficaz, são necessários calor suficiente e temperatura suficientemente. A temperatura dos gases que deixam a caldeira deve estar de 40 a 60° C acima da temperatura da água no interior da caldeira, e deve ser suficientemente alta para prevenir deposições ácidas que possam levar à corrosão dos tubos da caldeira; os gases que entram na caldeira, portanto, devem estar a, no mínimo, 400° C.

O método de recuperação de calor a partir dos gases de combustão tem sido aplicado em várias fábricas principalmente de produtos cerâmicos sanitários, e também em fábricas de produtos cerâmicos em geral. As caldeiras de recuperação de calor perdido utilizadas nestes casos fornecem uma fonte contínua de calor, o qual é utilizado para o aquecimento de ambientes ou para a secagem dos artigos em produção. Entretanto, a quantidade de vapor produzido não é muito grande; como ilustração, registre-se o exemplo de uma indústria que consegue obter cerca de 910 Kg de vapor por hora através de uma caldeira de recuperação conectada a dois fornos de cozimento de artigos sanitários. Uma vantagem deste sistema de recuperação de calor, - por exemplo, é que o vapor produzido é suficiente para cobrir as necessidades de secagem lenta dos artigos sanitários, e também para que se consiga obter um razoável aquecimento da fábri

ca no período noturno (quando for o caso), permitindo assim - que a caldeira principal seja desativada ao final do turno de trabalho. Uma desvantagem do sistema seria a possibilidade de que a temperatura dos gases de combustão à saída do forno variasse de acordo com a demanda de vapor, interferindo assim com o balanço e com a eficiência do forno.

Os gases de combustão também poderiam ser passados através de um trocador de calor, de modo a se obter ar quente. O ar quente obtido a partir desta fonte, juntamente com aquele obtido da zona de resfriamento de produtos, seria disponível - para o aquecimento de ambientes.

## 3

## Caldeiras de Recuperação

### 3.1. Introdução:

As caldeiras de recuperação têm sido continuamente desenvolvidas nos últimos quarenta anos. As instalações modernas mostram claramente os desenvolvimentos incorporados, como sendo o resultado de pesquisas e estudos de projetos neste campo especializado das instalações de geração de vapor.

O progresso no projeto destas caldeiras se faz necessário a fim de poder-se acompanhar os desenvolvimentos no projeto de fornalhas e fornos, o aumento da eficiência operacional, etc, e de se poder compatibilizar as novas caldeiras de recuperação com o fato de que os gases recuperáveis estão tendo seus campos de temperatura e volume cada vez mais estreitados.

Longe de serem um elemento indesejável na operação de fornalhas e fornos, as caldeiras tornaram-se parte integrante da recuperação de calor, do controle de tiragem e da limpeza de gases, para uma grande variedade de instalações. Por exemplo, no caso de uma instalação de forno metalúrgico de grande capacidade, torna-se essencial a inclusão de uma caldeira de recuperação de calor pois, sem ela, seria impossível reduzir a temperatura dos gases de escape econômica e eficientemente, a um ponto que permitisse o controle de tiragem por ventilador ou uma posterior limpeza dos gases por meio de um precipitador eletrostático.

Os desenvolvimentos já mencionados e a operação mais rápida dos fornos têm a necessidade de desenvolvimentos equivalentes no que tange à limpeza dos tubos das caldeiras de recuperação. Os métodos primitivos de escovação manual dos tubos eram aceitáveis para condições equivalentes de recuperação de

calor, mas eles necessitam de um esforço manual pouco econômico, se aplicados às caldeiras conectadas aos fornos modernos. Deste modo, para viabilizar a operação das caldeiras, é essencial que sua operação seja totalmente automática, requerendo - um mínimo de atenção especializada.

As instituições oficiais de saneamento exigem que a poluição atmosférica seja reduzida a um mínimo e, como nas instalações modernas as caldeiras de recuperação de calor são parte integrante dos equipamentos de resfriamento e limpeza dos gases, especial atenção deve ser dedicada a todos os itens que possam afetar a sua operação contínua. Qualquer interrupção acidental na operação da caldeira corresponderá a uma séria queda de eficiência da instalação de limpeza dos gases.

A questão da conservação da água também tem exercido influência na adoção de caldeiras de recuperação, pois os constituintes de fornos que eram normalmente resfriados por métodos normais, agora são incluídos como parte do circuito da caldeira, resultando em grande economia de água e numa considerável economia de instalações para resfriamento por água.

### 3.2. A Recuperação de Calor:

Para que fique claro o conceito de caldeira de recuperação, devemos primeiro introduzir a definição de gerador de vapor. O gerador de vapor é um trocador de calor complexo que produz vapor a partir de energia térmica, ar e fluido vaporizante, constituído de diversos equipamentos associados e perfeitamente integrados para permitir a obtenção do maior rendimento térmico possível. As mais simples unidades geradoras de vapor d'água são comumente conhecidas por caldeiras de vapor.

Nem sempre a fonte produtora de calor é um combustível, podendo ser aproveitados os calores de subprodutos, dando ao equipamento a denominação de caldeira de recuperação. A recuperação de calor dos subprodutos ou de gases resultantes de -

processos industriais é, como já foi citado, uma necessidade - frequente tanto do ponto de vista econômico, como por razões - de contaminação do ar ou da água. Toda ou parte da produção - de vapor requerida por uma fábrica pode ser suprida por caldeiras alimentadas à base de calor de recuperação. A recuperação de combustíveis especiais, embora importante, representa menos de 2% da quantidade total de energia.

O calor recuperável tem sua origem nos seguintes processos:

- a. o calor que se origina como parte necessária de um processo industrial e que, de outra maneira, seria desperdiçado; como exemplo temos os fornos de fogo aberto (Simens-Martin), ou os fornos de cozimento da indústria cerâmica (este é o caso em que se enquadra o projeto a que nos propomos).
- b. o calor como subproduto de um processo químico; por exemplo no caso da recuperação do licor negro
- c. o calor obtido pela combustão de subprodutos, tais como recortes de madeira

Qualquer tipo de produto ou gás procedente de processo industrial, e que é descarregado de forma contínua a uma temperatura igual ou superior a 400° C, pode ser utilizado em processo de recuperação de calor. Além do vapor útil que se pode obter, reduz-se a manutenção de dutos, ventiladores e chaminés. Os subprodutos recuperáveis mais importantes são: gases procedentes dos altos-fornos, gases dos fornos de coque e licor negro.

As necessidades específicas dos processos de produção de aço, cobre, zinco, cimento, papel e produtos similares fizeram surgir o projeto de vários tipos de caldeiras de recuperação. Como ilustração, vamos citar três destas caldeiras:

- i. caldeiras de tubos de fumaça: para gases relativamente limpos (verificar-se-á que este é o tipo construtivo mais conveniente para o presente projeto)
- ii. caldeiras de tubos de água: para gases limpos ou carrega-

dos de fuligem

iii. caldeiras de tubos curvados: para gases com grande quantidade de fuligem

### 3.3. Descrição dos principais tipos de Caldeiras de Recuperação:

#### 3.3.1. Caldeiras de Tubos de Fumaça:

No caso de caldeiras de tubos de fumaça submetidos a fogo direto, cuja superfície está parcialmente exposta ao fogo, a absorção de calor se faz tanto por radiação como por convecção e, por conseguinte, sua área de aquecimento é aproveitada com maior eficiência. Entretanto, para o aproveitamento do calor de recuperação, as caldeiras são, com poucas exceções, de um só passo, e absorvem unicamente calor de convecção procedente dos gases. A absorção de calor, portanto, especialmente para os baixos campos de temperatura, é essencialmente dependente da convecção, o que, em outras palavras, significa que os gases devem ter um contato físico molecular com as superfícies de aquecimento.

A concepção clássica das caldeiras de tubos de fumaça, fundamentada em estudos iniciais de Osborne Reynolds e Nicolson, seguidos por Kirk, é baseada em tubos retos tendo uma grande relação comprimento/diâmetro, com gases passando através dos tubos com velocidade igual ou superior a 18 m/s. Modificações para permitir o uso de velocidades menores, e ao mesmo tempo manter um contato efetivo, envolvem o uso de tubos ondulados.

A caldeira de tubos de fumaça está isenta de fugas trabalhando a pressão, e pode ser utilizada com gases em pulsações, tais como os procedentes do escapamento de motores diesel. Os tubos são de menor diâmetro e estão colocados a menor distância entre si do que nas caldeiras de fogo direto. Estes tubos são mantidos limpos por meio de um soprador especial rotativo. Para as incrustações são utilizadas varas largas, à

maneira de lanças operadas manualmente.

Estas caldeiras podem ser horizontais ou verticais. - Nas caldeiras horizontais grande parte do tambor está ocupada pelos tubos, ficando a câmara de vapor confinada à parte superior do citado tambor. Todos os tubos encontram-se submersos, a fim de evitar-se as tensões que se formam quando se usam tubos secos. A porta de inspeção, localizada na parte inferior, limita a quantidade de tubos que pode ser colocada nesta região do tambor. A caldeira geralmente é montada com um desnível de 15° para melhorar a circulação, armazenar vapor na parte superior e permitir que as partículas sólidas desçam por gravidade até a região inferior. As caldeiras horizontais são construídas com cascos de até 3,5 m de diâmetro, e com tubos de até 7,3 m de largura. No caso das caldeiras verticais, seu corpo cilíndrico está limitado a um diâmetro aproximado de 2,4 metros, devido às dificuldades de transporte e adaptação do tambor; seus tubos têm entre 51 e 64 mm de diâmetro externo.

Além dos problemas de projeto relativos às limitações de temperatura, a caldeira de recuperação deve ser capaz de funcionar por longos períodos, denotando-se assim a importância da limpeza ser executada durante a operação. Não apenas a produção de vapor é prejudicada quando a superfície de aquecimento está suja, como também a tiragem do forno fica sob risco, o que implicará em limitação para o funcionamento do forno.

As caldeiras de tubos de fumaça têm dominado largamente a recuperação de calor por sua simplicidade e compatibilidade. Entretanto, quando se necessita de pressões mais altas para o vapor produzido (pressões superiores a 30 Kgf/cm<sup>2</sup>), deve-se recorrer às caldeiras de tubos de água.

### 3.3.2. Caldeiras de Tubos de Água:

A produção de vapor a pressões elevadas e a altas temperaturas somente foi possível com

o advento das caldeiras de tubos de água. A circunstância de os tubos estarem situados fora dos corpos das caldeiras, a eles se unindo para constituírem um feixe tubular de água que compõe a parte principal de absorção de calor, permite a obtenção de superfícies de aquecimento praticamente ilimitadas. No interior dos tubos destas caldeiras circula a água; no exterior, através do caminho formado pela alvenaria e pelas chicanas internas, circulam os gases quentes.

Estudos experimentais demonstram que a redução do diâmetro dos tubos é vantajosa no caso das caldeiras de tubos de água. Entretanto, esta redução implica na necessidade de uma circulação forçada da água, a fim de se obter o máximo rendimento. Uma vantagem da circulação forçada é que o tambor e as bombas que lhe são associadas podem agora ser colocados em qualquer lugar conveniente, não precisando haver preocupação em termos da altura de seu posicionamento em relação ao resto da instalação.

A grande flexibilidade permitida pelo arranjo dos tubos que constituem as caldeiras de tubos de água possibilita conceber uma vasta variedade de tipos construtivos, os quais não serão tratados neste trabalho.

#### 3.4. Limpeza das Caldeiras:

Uma grande quantidade de fuligem é carregada pelos gases liberados pelos fornos ou fornalhas industriais, e a quantidade de material depositado nos tubos depende da natureza do material consumido no forno e da velocidade com que os gases atravessam o sistema. Um alto grau de deposição nos tubos pode retardar a transferência de calor, resultando numa temperatura mais elevada dos gases de escape e consequente perda na produção de vapor; além disto, o aumento da resistência à passagem dos gases através dos tubos implica na necessidade de um exaustor adicional para se poder manter as mesmas condições de tiragem. É, portanto, muito importante

manter-se as superfícies de troca de calor limpas.

Os métodos de limpeza podem ser classificados em dois grandes grupos: manual e mecânico. Um terceiro grupo, o químico, não é tido como um método de limpeza no sentido exato do termo, embora resulte usualmente na diminuição ou eliminação - da deposições.

### 3.4.1. Caldeiras de Tubos de Fumaça:

Vamos tratar brevemente da limpeza das caldeiras de tubos de fumaça, por ser o tipo construtivo que mais diretamente interessa ao projeto tratado na - parte B deste trabalho.

#### 3.4.1.1. Método Manual:

Vários métodos têm sido usados na limpeza dos tubos de fumaça. O método manual consiste em passar-se um agulha através dos tubos, que usa ar seco e limpo a pressão não inferior a  $7 \text{ Kgf/cm}^2$ . Ocasionalmente os tubos devem ser - limpos com escova de aço, para retirar-se as deposições que aderem às suas paredes.

#### 3.4.1.2. Método Mecânico:

O soprador de fuligem é o aparelho - mais largamente utilizado e aceito para limpeza em carga, mas uma instalação totalmente automática mostra-se bastante cara. Sopradores operados a mão têm muitos dos inconvenientes do método manual descrito acima, com sua ação sendo limitada ou anulada por uma operação deficiente. As principais desvantagens do soprador são o alto custo de operação em termos de vapor e ar comprimido, e a árdua manutenção para mantê-lo em suas melhores condições. Como o soprador de fuligem utiliza um jato de vapor, e como há a tendência de utilizar-se combustíveis - mais sulfurosos, pode haver problemas de corrosão.

Os raspadores, varas, batedores e cargas explosivas - são todos de uso limitado; os dois últimos são extremamente -

danosos se impropriamente aplicados.

A lavagem em carga, com água, limitada em virtude de sua natureza às caldeiras de tubos de água, é efetiva na eliminação de fuligem. As principais objeções a este método são: a corrosão, que não aparece necessariamente nos lugares em que a limpeza está sendo executada, mas em outros locais, e o problema da deposição dos efluentes.

#### 3.4.1.3. Método Químico:

Aditivos tais como amônia, zinco ou outros compostos convenientes podem ser injetados juntamente com o combustível, a fim de evitar-se a formação de substâncias indesejáveis, e para mudar a natureza das cinzas. Estes produtos químicos podem ser caros, mas a principal dificuldade é determinar em primeiro lugar o tipo de aditivo a ser utilizado e a razão de alimentação, e, em havendo mudança na composição do combustível, alterar o próprio aditivo e a técnica de injeção, a fim de se encontrar as novas condições de operação. Muitos aditivos trabalham sob o princípio de converter os produtos corrosivos da combustão em produtos químicos inertes e solúveis em água. Embora eles auxiliem consideravelmente no combate aos problemas de corrosão e no aumento da eficiência das caldeiras (por permitirem menores temperaturas de saída dos gases), os próprios aditivos e as substâncias resultantes, juntamente com as partículas provenientes dos gases de combustão, podem agravar o nível de fuligem, a qual precisa ser removida a fim de manter-se a caldeira em contínua operação.

#### √ 3.5. Considerações de Projeto:

Não basta o fato de que cada elemento da unidade geradora de vapor seja eficiente no aspecto individual, e que esteja bem construído. Nas condições econômicas atuais, é necessário obter, desde o princípio, o máximo de economia e segurança do conjunto, a um custo mínimo. Este objetivo é atingido por meio de um estudo rigoroso, a fim de -

que todos os componentes e acessórios que compõem a instalação guardem entre si uma relação equilibrada e conveniente. Cada elemento deve conservar uma proporção determinada com relação aos demais. Tanto o proprietário como o engenheiro, assim como o fabricante, têm um interesse comum na obtenção de uma instalação que seja o mais eficiente possível, e isto requer a sua mais íntima colaboração. Para assegurar a seleção correta do equipamento, é preciso considerar minuciosamente cada detalhe, independentemente do tamanho da unidade. Uma instalação satisfatória reflete um alto sentido de responsabilidade; a seleção de acessórios inadequados ou incompatíveis entre si ocasiona problemas que, posteriormente, afetarão a todos os interessados.

Os fatores predominantes na seleção de uma caldeira de recuperação baseiam-se nas seguintes considerações:

- a. natureza química, temperatura e corrosividade dos gases
- b. quantidade, porcentagem e natureza da fuligem contida nos gases
- c. tiragem de que se dispõe
- d. localização desejada para o conduto de saída ou descarga
- e. se os gases se encontram sob pressão ou sob sucção
- f. espaço disponível
- g. condições do vapor a ser produzido
- h. necessidade de combustão suplementar
- i. outras necessidades especiais do processo individual

Em geral o projetista de caldeiras trata de conseguir uma velocidade relativamente alta através de um número reduzido de tubos, a fim de aumentar a transferência de calor por convecção e contrabalançar assim as temperaturas baixas dos gases.

Nos gases quentes recuperáveis obtidos para a geração de vapor, encontra-se grande quantidade de fuligem, mas as caldeiras podem ser mantidas em condições corretas de operação de acordo com o que já foi aqui descrito anteriormente. Os gases

muito carregados de fuligem devem ser mantidos a velocidade -  
baixa, a fim de se reduzir ao mínimo a sua ação abrasiva sobre  
os tubos. Se os gases contiverem partículas sólidas ou ígneas  
(pegajosas ou adesivas), devem ser resfriados antes de passar  
pelas zonas de convecção.

PARTE "B":

Projeto

## 4

## Cálculos Térmicos

## 4.1. Introdução:

O projeto a que nos propomos enquadra-se num grupo em que a fonte supridora da caldeira de recuperação é o calor sensível dos gases quentes residuais de processos de cozimento da indústria cerâmica sanitária. Para o cálculo da caldeira, o combustível queimado no forno de cozimento será o óleo combustível, numa razão estimada de 500 Kg por hora. Determinou-se também que o vapor deverá ser produzido a uma pressão de 5 Kgf/cm<sup>2</sup>. Sabemos ainda que os gases de combustão deixam o forno de cozimento e entram na caldeira de recuperação - têm uma temperatura em torno de 400 a 450° C.

A figura 1 do anexo apresenta um fluxograma representativo da introdução de uma caldeira de recuperação no processo produtivo de uma indústria cerâmica fina.

4.2. Volume dos Gases na Saída do Forno de Cozimento (Nm<sup>3</sup>/h):

O óleo combustível empregado para alimentar o forno de cozimento (suposto BPF) apresenta as seguintes características:

## Composição:

- carbono	85,89% (c)
- hidrogênio	11,66% (h)
- enxofre	2,40% (s)
- água e sedimentos	0,05% (w)

## Outras Características:

- densidade (15° C)	0,9558
- ponto de fluidez (0° C)	0
- viscosidade SFS (50° C)	122

- pcs	10.450 Kcal/Kg
- pci	9.800 Kcal/Kg
- ponto de fulgor (vaso aberto)	102

#### 4.2.1. Volume de Ar Teórico $V_{ar}^t$ :

$$V_{ar}^t = 8,876.c + 26,443.h + 3,32.s - 3,332.o$$

Utilizando-se os valores mencionados acima, temos:

$$V_{ar}^t = 8,876.0,8589 + 26,443.0,1166 + 3,32.0,024 - 0$$

$$V_{ar}^t = 10,787 \text{ Nm}^3/\text{Kg de combustível}$$

#### 4.2.2. Volume de Gás Teórico $V_g^t$ :

$$V_g^t = 1,8535.c + 0,693.s + 0,8.n + 0,79.V_{ar}^t + (9.h + w).1,24$$

Introduzindo os valores já citados, vem:

$$V_g^t = 1,8535.0,8589 + 0,693.0,024 + 0 + 0,79.10,787 + \\ + (9.0,1166 + 0,0005).1,24$$

$$V_g^t = 11,432 \text{ Nm}^3/\text{Kg de combustível}$$

#### 4.2.3. Volume de Gás Real $V_g^r$ :

De acordo com Esso Oilways volume VI, as quantidades usuais de excesso de ar (m) para abastecimento de queimadores de óleo combustível situa-se entre 5 e 20%. Para o nosso caso, vamos adotar  $m = 12\%$ . Assim, o volume real dos gases de combustão será dado por:

$$V_g^r = V_g^t + (m - 1).V_{ar}^t$$

$$V_g^r = 11,432 + (1,12 - 1).10,787$$

$$V_g^r = 12,726 \text{ Nm}^3/\text{Kg de combustível}$$

Considerando-se que a caldeira queima 500 Kg de óleo -

combustível por hora, teremos o seguinte volume de gases por -  
unidade de tempo:

$$V_g^r = 12,726.500 \quad V_g^r = 6363,0 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

#### 4.3. Composição do Gás em Volume:

- CO<sub>2</sub>

$$q_{\text{CO}_2} = \frac{1,8535 \cdot c}{V_g^r} = \frac{1,8535 \cdot 0,8589}{12,726} \quad q_{\text{CO}_2} = 12,5\%$$

- SO<sub>2</sub>

$$q_{\text{SO}_2} = \frac{0,693 \cdot s}{V_g^r} = \frac{0,693 \cdot 0,024}{12,726} \quad q_{\text{SO}_2} = 0,2\%$$

- H<sub>2</sub>O

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{(9 \cdot h + w) \cdot 1,24}{V_g^r} \\ = \frac{(9 \cdot 0,1166 + 0,0005) \cdot 1,24}{12,726} \quad q_{\text{H}_2\text{O}} = 10,2\%$$

- N<sub>2</sub>

$$q_{\text{N}_2} = \frac{0,79 \cdot V_{\text{ar}}^t \cdot 1,12}{V_g^r} = \frac{0,79 \cdot 10,787 \cdot 1,12}{12,726} \quad q_{\text{N}_2} = 75,0\%$$

- O<sub>2</sub>

$$q_{\text{O}_2} = \frac{0,21 \cdot V_{\text{ar}}^t \cdot 0,12}{V_g^t} = \frac{0,21 \cdot 10,787 \cdot 0,12}{12,726} \quad q_{\text{O}_2} = 2,1\%$$

#### 4.4. Características do Vapor:

A caldeira que projetaremos de-  
verá produzir vapor saturado seco, com as seguintes caracteris-  
ticas:

$$\begin{aligned} p & \dots 5 \text{ Kgf/cm}^2 \\ T & \dots 151,1 \text{ }^\circ\text{C} \\ h_v & \dots 655,9 \text{ Kcal/Kg} \\ v & \dots 0,3816 \text{ m}^3/\text{Kg} \end{aligned}$$

#### 4.5. Temperaturas:

Para a temperatura de entrada dos gases na caldeira de recuperação ( $t_e$ ), vamos admitir o valor  $450^\circ\text{C}$ . Como a temperatura dos gases que deixam a caldeira ( $t_s$ ) deve estar pelo menos  $40$  a  $60^\circ\text{C}$  acima da temperatura da água na caldeira, vamos assumir para  $t_s$  o valor de  $220^\circ\text{C}$ .

#### 4.6. Calor Disponível (calor de recuperação $Q_r$ ):

O calor sensível recuperado se determina pela seguinte expressão:

$$Q_r = V_g^r \cdot C_{p_m} \cdot (t_e - t_s), \text{ onde:}$$

$Q_r$  - calor de recuperação em Kcal

$V_g^r$  - volume real dos gases em  $\text{Nm}^3/\text{h}$

$C_{p_m}$  - calor específico médio, a pressão constante, da mistura gasosa a temperatura média, em  $\text{Kcal}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$

$t_e$  - temperatura de entrada dos gases na caldeira, em  $^\circ\text{C}$

$t_s$  - temperatura de saída dos gases da caldeira, em  $^\circ\text{C}$

#### 4.6.1. Cálculo do Calor Específico Médio $C_{p_m}$ da Mistura de Gases:

Temperatura média  $T_m$ :

$$t_m = \frac{t_e - t_s}{2} = \frac{450 - 220}{2} = 335,0^\circ\text{C} \quad \text{ou} \quad T_m = 608,1 \text{ K}$$

Para a temperatura média  $T_m$  calculada acima, temos:

a.  $\text{SO}_2$

$$C_{p_{\text{SO}_2}} = (7,70 + 0,0053 \cdot T_m - 8,3 \cdot 10^{-7} \cdot T_m^2) \cdot \frac{1}{\text{Kmol}_{\text{SO}_2}}$$

$$C_{p_{\text{SO}_2}} = (7,70 + 0,0053 \cdot 608,1 - 8,3 \cdot 10^{-7} \cdot 608,1^2) \cdot \frac{1}{64}$$

$$C_{p_{\text{SO}_2}} = 0,1658 \text{ Kcal}/\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

b.  $\text{CO}_2$

$$C_{p_{CO_2}} = (-0,89286 + 7,2967 \cdot (\frac{T_m}{100})^{0,5} - 0,98074 \cdot (\frac{T_m}{100}) + 5,7835 \cdot 10^{-3} \cdot (\frac{T_m}{100})^2) \cdot \frac{1}{\text{Kmol}_{CO_2}}$$

$$C_{p_{CO_2}} = (-0,89286 + 7,2967 \cdot (6,081)^{0,5} - 0,98074 \cdot 6,081 + 5,7835 \cdot 10^{-3} \cdot (6,081)^2) \cdot \frac{1}{44}$$

$$C_{p_{CO_2}} = 0,2595 \text{ Kcal/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

c. H<sub>2</sub>O

$$C_{p_{H_2O}} = (34,190 - 43,868 \cdot (\frac{T_m}{100})^{0,25} + 19,778 \cdot (\frac{T_m}{100})^{0,5} - 0,88407 \cdot (\frac{T_m}{100})) \cdot \frac{1}{\text{Kmol}_{H_2O}}$$

$$C_{p_{H_2O}} = (34,190 - 43,868 \cdot (6,081)^{0,25} + 19,778 \cdot (6,081)^{0,5} - 0,88407 \cdot (6,081)) \cdot \frac{1}{18}$$

$$C_{p_{H_2O}} = 0,4830 \text{ Kcal/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

d. N<sub>2</sub>

$$C_{p_{N_2}} = (9,3355 - 122,56 \cdot (\frac{T_m}{100})^{-1,5} + 256,38 \cdot (\frac{T_m}{100})^{-2} - 196,08 \cdot (\frac{T_m}{100})^{-3}) \cdot \frac{1}{\text{Kmol}_{N_2}}$$

$$C_{p_{N_2}} = (9,3355 - 122,56 \cdot (6,081)^{-1,5} + 256,38 \cdot (6,081)^{-2} - 196,08 \cdot (6,081)^{-3}) \cdot \frac{1}{28}$$

$$C_{p_{N_2}} = 0,2578 \text{ Kcal/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

e. O<sub>2</sub>

$$C_{p_{O_2}} = (8,9465 + 4,8044 \cdot 10^{-3} \cdot (\frac{T_m}{100})^{1,5} - 42,679 \cdot (\frac{T_m}{100})^{-1,5} + 56,615 \cdot (\frac{T_m}{100})^{-2}) \cdot \frac{1}{\text{Kmol}_{O_2}}$$

$$C_{p_{O_2}} = (8,9465 + 4,8044 \cdot 10^{-3} \cdot (6,081)^{1,5} - 42,679 \cdot (6,081)^{-1,5} + 56,615 \cdot (6,081)^{-2}) \cdot \frac{1}{32}$$

$$- 42,679 \cdot (6,081)^{-1,5} + 56,615 \cdot (6,081)^{-2} \cdot \frac{1}{32}$$

$$Cp_{O_2} = 0,2407 \text{ Kcal/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

As massas específicas Me que irão afetar os calores específicos individuais são:

a.  $SO_2$

$$Me_{SO_2} = \frac{64}{22,4}$$

$$Me_{SO_2} = 2,857 \text{ Kg/Nm}^3$$

b.  $CO_2$

$$Me_{CO_2} = \frac{44}{22,4}$$

$$Me_{CO_2} = 1,964 \text{ Kg/Nm}^3$$

c.  $H_2O$

$$Me_{H_2O} = \frac{18}{22,4}$$

$$Me_{H_2O} = 0,803 \text{ Kg/Nm}^3$$

d.  $N_2$

$$Me_{N_2} = \frac{28}{22,4}$$

$$Me_{N_2} = 1,250 \text{ Kg/Nm}^3$$

e.  $O_2$

$$Me_{O_2} = \frac{32}{22,4}$$

$$Me_{O_2} = 1,428 \text{ Kg/Nm}^3$$

Finalmente, o calor específico médio é dado por:

$$Cp_m = \frac{\sum q_i \cdot Me_i \cdot Cp_i}{100}, \text{ onde:}$$

$q_i$  - porcentagem, em volume, do componente i na mistura

$Me_i$  - massa específica do componente i na mistura

$Cp_i$  - calor específico do componente i na mistura (à temperatura média)

$$Cp_m = (q_{CO_2} \cdot Me_{CO_2} \cdot Cp_{CO_2} + q_{SO_2} \cdot Me_{SO_2} \cdot Cp_{SO_2} + q_{H_2O} \cdot Me_{H_2O} \cdot Cp_{H_2O} + q_{N_2} \cdot Me_{N_2} \cdot Cp_{N_2} + q_{O_2} \cdot Me_{O_2} \cdot Cp_{O_2}) \cdot \frac{1}{100}$$

$$Cp_m = (12,5 \cdot 1,964 \cdot 0,2595 + 0,2 \cdot 2,857 \cdot 0,1658 + 10,2 \cdot 0,803 \cdot 0,483 +$$

$$+ 75,0.1,250.0,2578 + 2,1.1,428.0,2407) \cdot \frac{1}{100}$$

$$C_{p_m} = 0,353 \text{ Kcal/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

#### 4.6.2. Calor de Recuperação $Q_r$ :

$$Q_r = V_g^r \cdot C_{p_m} \cdot (t_e - t_s) = 6363,0 \cdot 0,353 \cdot (450 - 220)$$

$$Q_r = 516.612,0 \text{ Kcal/h}$$

#### 4.7. Cálculo da Descarga de Vapor (D):

Adescarga do vapor gerado pela caldeira é dada pela seguinte expressão:

$$D = \frac{Q_r}{(h_v - h_a)}, \text{ onde:}$$

$Q_r$  - calor de recuperação, em Kcal/h

$h_v$  - entalpia do vapor produzido, em Kcal/Kg

$h_a$  - entalpia da água de alimentação da caldeira, em Kcal/Kg

Para a nossa situação, vamos supor que a água de alimentação tenha uma temperatura de  $60^\circ\text{C}$ ; vamos admitir ainda - que a concentração de sólidos totais dissolvidos na água de alimentação seja igual a 0,3 graus Beaumé. Como a entalpia da água pode ser bem aproximada pela sua temperatura, teremos -

$h_a = 60 \text{ Kcal/Kg}$ . Assim:

$$D = \frac{516612,0}{(655,9 - 60)}$$

$$D = 866,9 \text{ Kg de vapor/hora}$$

#### 4.8. Escolha do Tipo de Caldeira:

Como já foi esplanado na parte A deste trabalho, existem dois tipos fundamentais de caldeiras: caldeiras de tubos de fumaça (Smoke-tube boilers) e caldeiras de tubos de água (Water-tube boilers). No primeiro tipo os gases quentes atravessam a caldeira pelo interior dos tu

bos, cedendo calor à água contida no corpo que envolve os tubos; no segundo tipo os gases quentes atravessam a caldeira externamente aos tubos, cedendo calor à água contida no interior destes tubos.

Para o caso deste projeto, temos uma produção de vapor de 866,9 Kg/h, a uma pressão de 5 Kgf/cm<sup>2</sup>. Ora, como a produção de vapor citada é pequena, e a pressão é baixa, o tipo construtivo recomendado é a caldeira de tubos de fumaça; somente produções de vapor superiores a 6000 Kg/h ou pressões superiores a 18 Kgf/cm<sup>2</sup> justificariam a utilização de uma caldeira de tubos de água.

Realmente, sua simplicidade e compacticidade fazem com que as caldeiras de tubos de fumaça dominem a recuperação de calor perdido, dentro dos limites de pressão e produção de vapor citados acima. Além disto, estas caldeiras ainda apresentam facilidade de limpeza, facilidade de manutenção, dispensa tratamento rigoroso da água de alimentação, e apresentam um custo de aquisição mais baixo.

Para um funcionamento correto da caldeira, a velocidade dos gases que fluem pelo interior dos tubos deve ser superior a 60 ft/sec (18 m/s). A utilização de velocidades menores envolveria também a necessidade do uso de tubos ondulados ou espirais, ao invés da utilização de tubos retos. Assim, adotaremos uma velocidade dos gases nos tubos, à temperatura média, de 20 m/s; esta velocidade nos permitirá a utilização de tubos retos.

#### 4.9. Escolha dos Tubos Utilizados:

Estes tubos deverão ter uma seção transversal (A) compatível com a velocidade dos gases ( $v = 20$  m/s à temperatura média), e com a vazão dos gases à temperatura média ( $V_g^r$ ). Esta vazão pode ser calculada aproximadamente por:

$$\frac{V_g^r \cdot p_{atm}}{T_n} = \frac{V_m^r \cdot p_{atm}}{T_m}, \text{ onde:}$$

- $V_g^r$  - vazão dos gases nas condições normais  
 $p_{atm}$  - pressão normal (1 atm)  
 $T_n$  - temperatura normal (273,1 K)  
 $T_m$  - temperatura média dos gases (608,1 K)

Assim:

$$V_m^r = \frac{V_g^r \cdot T_m}{T_n} = \frac{6363,0 \cdot 608,1}{273,1}$$

$$V_m^r = 14.168,2 \text{ m}^3/\text{h} \quad \text{ou} \quad V_m^r = 3,94 \text{ m}^3/\text{s}$$

A área total de passagem dos gases quentes ( $S_t$ ) será dada por:

$$S_t = \frac{V_m^r}{v} \quad S_t = \frac{3,94}{20} \quad S_t = 0,197 \text{ m}^2$$

Como os tubos para caldeiras pequenas devem possuir aproximadamente entre 2" a 4" de diâmetro, escolheremos o seguinte tubo (de acordo com ABNT - P - EB - 334):

- diâmetro nominal  $d_n$ : 50,00 mm
- diâmetro externo  $d_e$ : 60,32 mm
- diâmetro interno  $d_i$ : 52,50 mm
- espessura da parede:  $e = 3,91$  mm
- peso teórico: 5,43 Kg/m
- classe N
- série 40

ABNT NBR 6943  
 1,5" 10mm norm  
 $d_e = 48,3$  48,3/49,9  
 $d_i =$   
 $e = 3,75$

4,12 kg/m

100 carbon =

Para este tipo de tubo temos:  $A = 2,16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ . Assim, o número de tubos  $n$  será dado por:

$$n = \frac{S_t}{A} = \frac{1,97 \cdot 10^{-1}}{2,16 \cdot 10^{-3}}$$

$$n = 91,2$$

$$p = \frac{e \cdot e}{r_i}$$

Deste modo, adotaremos

$$n = 92 \text{ tubos}$$

#### 4.10. Dimensionamento da Caldeira:

O dimensionamento da caldeira é feito com base nos cálculos térmicos envolvidos no problema.

O calor gerado por um combustível é transferido para o fluido interno do gerador por meio de três processos: radiação, convecção e condução. No caso de uma caldeira de recuperação de calor sensível, o processo de transmissão de calor por radiação não apresenta importância. Desta forma, o calor dos gases irá se transferir ao fluido interno do gerador mediante a combinação dos processos de condução e convecção.

O mecanismo pelo qual o calor se transfere através da parede tubular metálica se processa da seguinte forma:

a) o calor inicialmente se transfere por convecção para uma camada gasosa intimamente ligada ao tubo e praticamente estacionária em virtude das resistências oferecidas ao escoamento do gás. Este filme gasoso age como se fora uma espessura do material através do qual o calor flui por condução. Uma apreciável resistência ao fluxo de calor é determinada pela baixa condutividade do gás. É devido a este fator que o coeficiente de película do gás é sensivelmente menor que o coeficiente de película da água.

b) posteriormente o calor segue por condução através da parede metálica. Neste caso, o escoamento de calor é facilitado pela boa condutividade térmica do metal.

c) atingido o lado da água, novamente se verifica a condução, agora através do filme de água (filme este praticamente estacionário), e posteriormente segue-se a convecção para a água circulante.

O calor total transferido se determina pela expressão:

$$Q_t = U.S.\Delta t_{\log} , \text{ onde:}$$

$Q_t$  - calor total transferido (Kcal/h)

U - coeficiente global de transmissão de calor (Kcal/h.m<sup>2</sup>.°C)  
 $\Delta t_{\log}$  - diferença de temperatura média logarítmica  
 S - superfície de troca de calor (m<sup>2</sup>)

As parcelas da expressão acima serão determinadas como segue:

a. 
$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{gás}}} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h'_{\text{água}}}}$$
, onde: h - coeficiente de transmissão de calor por convecção (Kcal/h.m<sup>2</sup>.°C)  
 e - espessura do material (m)  
 k - condutibilidade térmica do material (Kcal/h.m.°C)

Como, na prática, a resistência térmica do gás é muito maior que a do tubo e a da água, podemos adotar:

$$U = h_{\text{gás}}$$

b. 
$$\Delta t_{\log} = \frac{t_e - t_s}{\ln \frac{t_e - t_v}{t_s - t_v}}$$
, onde:  $t_e$  - temperatura de entrada dos gases em °C  
 $t_s$  - temperatura de saída dos gases em °C  
 $t_v$  - temperatura de vaporização à pressão de trabalho em °C

Para a situação de projeto, temos:

$$\Delta t_{\log} = \frac{450 - 220}{\ln \frac{450 - 151,1}{220 - 151,1}} \quad \Delta t_{\log} = 156,74^\circ\text{C}$$

O coeficiente de transmissão de calor por convecção dos gases ( $h_{\text{gás}}$ ) pode ser calculado pela expressão dada por Schaack, a qual é empregada para caldeiras de tubos de fumaça:

114

$$h_{\text{gás}} = \left( 3,6 + 0,26 \cdot \frac{\theta}{100} - 0,0076 \cdot \left( \frac{\theta}{100} \right)^2 \right) \cdot \frac{C_o^{0,75}}{d^{0,25}}$$

onde:  $\theta$  - temperatura média dos gases ( $^{\circ}\text{C}$ )

$d$  - diâmetro do tubo, no qual se baseia o cálculo (m)

$C_o$  - velocidade dos gases (em m/s) nas condições normais de pressão e temperatura ( $0^{\circ}\text{C}$  e 760 mmHg =  $1,013 \text{ Kgf/cm}^2$ ). Este valor é fictício, e pode ser determinado pela expressão:

$$C_o = \frac{C \cdot 264 \cdot p}{273 + \theta} \quad , \quad \text{onde } C \text{ é a velocidade dos gases na pressão } p \text{ de trabalho}$$

Para o nosso caso temos:

$$C_o = \frac{20 \cdot 264 \cdot 1,013}{273 + 335} \quad C_o = 8,797 \text{ m/s}$$

Substituindo os valores na expressão de  $h_{\text{gás}}$ , temos:

$$h_{\text{gás}} = \left( 3,6 + 0,26 \cdot 3,35 - 0,0076 \cdot (3,35)^2 \right) \cdot \frac{8,797^{0,75}}{0,0525^{0,25}}$$

$$h_{\text{gás}} = 46,8 \text{ Kcal/h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

Podemos agora calcular a superfície de troca de calor:

$$S = \frac{Q_t}{h_g \cdot \Delta t_{\text{log}}} \quad , \quad \text{onde } Q_t = Q_r = 516612 \text{ Kcal/h}$$

$$\Delta t_{\text{log}} = 156,74^{\circ}\text{C}$$

Portanto:

$$S = \frac{516612}{46,8 \cdot 156,74} \quad S = 70,4 \text{ m}^2$$

A área de troca de calor de cada tubo ( $A_t$ ) vale:

$$A_t = L \cdot \pi \cdot d_i \quad , \quad \text{onde: } L \text{ - comprimento dos tubos (m)}$$

$$d_i \text{ - diâmetro interno (m)}$$

$$A_t = L \cdot \pi \cdot 0,0525$$

$$A_t = 0,165 \cdot L$$

E a área dos 92 tubos ( $S'$ ) será:

$$S' = \sum A_t = 92 \cdot 0,165 \cdot L$$

$$S' = 15,2 \cdot L$$

Como devemos ter  $S = S'$ , vem:

$$70,4 = 15,2 \cdot L$$

$$L = 4,6 \text{ m}$$

Levando-se em conta que o tipo de caldeira deste projeto (no caso, horizontal) é construído com tubos de até 7,3 m, temos que o comprimento obtido de 4,6 m é bastante razoável.

#### 4.11. Cálculo da Válvula Principal de Saída de Vapor:

O vapor - deve ser descarregado pela parte superior da caldeira. Segundo Shields, a velocidade de descarga do vapor não deve exceder 30 ft/sec (9,14 m/s), pois se isso ocorresse teríamos a entrada de água no sistema, resultando num vapor úmido. Deste modo, adotaremos para a velocidade de saída do vapor  $V_v = 9 \text{ m/s}$ .

Tem-se que:

$$Q_v = V_v \cdot S_v, \text{ onde: } Q_v - \text{ vazão de vapor em volume}$$

$$S_v - \text{ seção da válvula de saída de vapor}$$

Mas  $Q_v = D \cdot v$ , onde:  $v$  - volume específico do vapor à temperatura de  $151,1^\circ\text{C}$  e pressão de  $5 \text{ Kg/cm}^2$  ( $v = 0,3812 \text{ m}^3/\text{Kg}$ )  
 $D$  - descarga de vapor (calculada no item 4.7.)

Portanto:

$$S_v = \frac{Q_v}{V_v} = \frac{866,9.0,3816}{9.3600}$$

$$S_v = 0,0102 \text{ m}^2$$

O diâmetro da válvula de saída de vapor  $D_v$  é dado por:

$$D_v = \sqrt{\frac{4.S_v}{\pi}} \quad ; \text{ substituindo o valor acima, vem:}$$

$$D_v = \sqrt{\frac{4.0,0102}{\pi}} \quad D_v = 0,114 \text{ m} = 114 \text{ mm}$$

Assim, vamos adotar como diâmetro da saída principal - de vapor

$$D_v = 4 \frac{1}{2}''$$

#### 4.12. Cálculo do Volume da Câmara de Vapor:

É indispensável contar com um espaço adequado para o vapor, a fim de impedir o arraste de água e garantir a produção de vapor seco. O tamanho da câmara de vapor também deve estar de acordo com a demanda de carga, pois uma câmara de vapor insuficiente tem um efeito nocivo sobre a manutenção de uma pressão constante com cargas variáveis.

##### 4.12.1. Volume Teórico Mínimo da Câmara de Vapor:

A determinação teórica do volume da câmara de vapor é feita por intermédio do diagrama ilustrado na figura 2 do anexo. Este diagrama fornece uma relação entre o volume da câmara e a produção da caldeira. Assim, conhecendo-se a concentração de sólidos totais em solução na água interna, pode-se estabelecer qual o mínimo volume do tambor da caldeira que deve ser reservado à câmara de vapor.

Para o caso deste projeto, temos uma pressão de 5 Kgf/cm<sup>2</sup> e uma concentração de sólidos totais de 0,3 Beaumé (já estabelecidos anteriormente). De acordo com o diagrama da figura 2, para estes valores deveremos ter, no mínimo, um metro cúbico de câmara para cada 1730 m<sup>3</sup>/h de produção de vapor.

A descarga de vapor, já calculada anteriormente, vale  $D = 866,9$  quilogramas de vapor por hora; o volume específico do vapor produzido vale  $v = 0,3816$  m<sup>3</sup>/Kg. Portanto, teremos a seguinte vazão de vapor  $Q_v$ :

$$Q_v = D.v = 866,9.0,3816 \quad Q_v = 330,8 \text{ m}^3/\text{h}$$

O volume mínimo da câmara de vapor ( $V_{\text{mín}}$ ) será:

$$V_{\text{mín}} = \frac{Q_v}{1730} = \frac{330,8}{1730}, \quad V_{\text{mín}} = 0,2 \text{ m}^3$$

#### 4.12.2. Volume Real da Câmara de Vapor (V):

O volume real da câmara de vapor depende, evidentemente, da distribuição dos tubos no corpo da caldeira. Esta distribuição foi conseguida - por método geométrico, idealizado de modo a se acomodar 92 tubos, e realizada em forma de quincôncio. Considerou-se, também, o devido espaço para a porta de inspeção.

A partir da figura 3 do anexo, que representa esquematicamente a câmara de vapor (região I) e a região reservada - aos tubos, tirantes e porta de inspeção (região II), podemos calcular o volume real da câmara de vapor (V):

$$V = L.A_I, \quad \text{onde: } L - \text{comprimento dos tubos (4,6 m)}$$

$$A_I - \text{área do segmento circular I}$$

Vamos calcular inicialmente a área do segmento circular I:

$$A_I = \frac{D_t^2}{8} \cdot (\alpha - \sin \alpha) \quad \alpha = \frac{153}{180} \cdot \pi$$

$$A_I = \frac{1,9^2}{8} \cdot (2,67 - \sin 153^\circ) \quad \alpha = 2,67 \text{ rad}$$

$$A_I = 0,99 \text{ m}^2$$

Portanto, o volume real da câmara será:

$$V = 4,6 \cdot 0,99$$

$$V = 4,55 \text{ m}^3$$

Como o volume real (V) da câmara de vapor é maior que o volume mínimo ( $V_{\min}$ ) calculado anteriormente, não haverá problema em se adotar para diâmetro do tambor:

$$D_t = 1900 \text{ mm}$$



## 5

## Cálculos Mecânicos

5.1. Introdução:

Os elementos normalmente calculáveis nas caldeiras são os corpos cilíndricos submetidos a pressão, os fundos da caldeira e os tirantes. Nesta seção, procederemos o cálculo da espessura da parede do tambor, o cálculo da espessura do espelho (pois no caso deste projeto são utilizados fundos planos), e a escolha do tipo de tirante utilizado.

5.2. Cálculo da Espessura da Parede do Tambor (E):

Para o cálculo da espessura da parede do tambor, utilizaremos a seguinte expressão (a qual está de acordo com as normas alemãs):

$$p = \frac{\sigma \cdot \eta}{S} \cdot \ln \frac{\phi_e}{\phi_i}, \text{ onde: } p - \text{pressão interna}$$

$\sigma$  - tensão admissível do material

$S$  - coeficiente de segurança

$\eta$  - fator que considera o enfraquecimento devido às soldas e furações

$\phi_e$  - diâmetro externo do tambor

$\phi_i$  - diâmetro interno do tambor

Vamos passar a analisar cada um dos fatores envolvidos neste cálculo:

- a. Temperatura de Cálculo: para a temperatura de cálculo ( $t_c$ ), a fim de se escolher o material e sua tensão admissível, vamos adotar, de acordo com as normas ale

mãs, a temperatura do vapor produzido na caldeira, ou seja, -  
 $t_c = 151,1^\circ\text{C}$ .

b. Tensão Admissível ( $\sigma$ ): como a temperatura de cálculo é menor que  $350^\circ\text{C}$ , a tensão admissível a ser adotada será o limite de escoamento a quente, o qual é entendido, de acordo com a norma DIN 50 112, como a máxima sollicitação que um material ainda suporta para carga estática e - que, porém, em certas circunstâncias, pode produzir apreciável deformação permanente. Em acordo com a norma DIN 17 155 (características de chapas para construção de tambores de caldeiras), vamos adotar o material HIA, o qual, para a temperatura de cálculo citada acima, apresenta uma tensão admissível de valor  $\sigma = 19,0 \text{ Kg/mm}^2$ .

c. Coeficiente de Segurança (S): para o caso deste projeto (gerador de vapor terrestre), vamos adotar  $S = 1,5$ .

d. Fator de Enfraquecimento devido às Soldas e Furações: neste caso - (tambor soldado), vamos admitir  $\eta = 0,5$ .

De posse dos valores citados acima, podemos calcular o diâmetro externo do tambor  $\phi_e$ , e, conseqüentemente, o valor da espessura do tambor (E):

$$p = \frac{\sigma \cdot \eta}{S} \cdot \ln \frac{\phi_e}{\phi_i} \qquad \frac{p \cdot S}{\sigma \cdot \eta} = \ln \frac{\phi_e}{\phi_i}$$

$$\frac{\phi_e}{\phi_i} = e^{(pS/\sigma\eta)} \qquad \phi_e = \phi_i \cdot e^{(pS/\sigma\eta)}$$

$$\phi_e = 1900 \cdot e^{\frac{5 \cdot 10^{-2} \cdot 1,5}{19,0 \cdot 0,5}}$$

$$\phi_e = 1915,1 \text{ mm}$$

A espessura E do tambor será dada por:

$E = \phi_e - \phi_i + c$ , onde c é uma constante que considera a tolerância na espessura da chapa, e o desgaste da mesma com o tempo. Adotando-se  $c = 2,9$  teremos:

$$E = 1915,1 - 1900 + 2,9 \qquad E = 18 \text{ mm}$$

Adotaremos

$$E = 3/4''$$

### 5.3. Cálculo da Espessura dos Fundos Planos (f):

Para se poder calcular a espessura dos fundos planos, é necessário que primeiramente se determine a espessura dos tirantes a serem utilizados. Como, em nosso caso, a pressão de produção de vapor é relativamente pequena, podemos utilizar os próprios tubos para servir de reforço às superfícies planas contra as pressões interiores, isto é, podemos utilizar alguns dos tubos de passagem de gás como tubos tirantes. Estes tubos deverão ter sua disposição em acordo com a figura 4 do anexo.

A espessura da parede dos espelhos (f) é dada pela expressão:

$$f = c \cdot \sqrt{\frac{p \cdot (a^2 + b^2) \cdot S}{\sigma}} + c, \text{ onde: } a, b - \text{são dimensões que ca-}$$

racterizam a disposição dos tubos tirantes ( ver figura 4 do anexo)

p - pressão interna

C-coeficiente que depende das condições de carga

$\sigma, S, c$  - são os mesmos fatores já referi-

dos no item 5.2.

Fazendo-se  $\sigma = 19,0 \text{ Kgf/mm}^2$ ,  $S = 1,5$ ,  $C = 1,0$  e  $c = 0,5 \text{ mm}$ , e substituindo estes valores na expressão de  $f$ , vem:

$$f = 1,0 \cdot \sqrt{\frac{5,0 \cdot (22,5^2 + 25,5^2) \cdot 1,5}{19,0}} + 0,5$$

$$f = 21,9 \text{ mm}$$

Adotaremos

$$f = 7/8''$$

## 6

## Parte Construtiva

Os padrões em termos de materiais e mão de obra para a construção de caldeiras estacionárias são estabelecidos pelo código ASME de caldeiras, ou por outros códigos disponíveis na literatura. Entretanto a fabricação de caldeiras é algo mais que uma questão de cumprimento de requisitos básicos de projeto e materiais. Muitas características adicionais desejáveis são incluídas na construção das caldeiras. Estes aperfeiçoamentos são o resultado da experiência e da habilidade obtida a través da prática pelo fabricante de caldeiras, pelo engenheiro e pelo proprietário da unidade.

Os materiais empregados na construção de caldeiras regem-se por especificações cuidadosamente estabelecidas. O fabricante conserva consigo um registro preciso de todos os materiais utilizados. Todo aço destinado à construção de caldeiras é acompanhado por um relatório de ensaios da companhia laminadora, onde se anota o nome do fabricante, número do lingote, espessura, e outras características físicas necessárias, tais como resistência à tração, alongamento e limite de elasticidade.

A caldeira deve ser fabricada satisfazendo a padrões - razoáveis de segurança, resistência e durabilidade necessários. Para se assegurar uma operação contínua e satisfatória, todos os elementos da unidade devem estar garantidos contra deslocamentos, distorções, flexões e outras formas de deterioração; - os suportes devem ser colocados de forma a manterem uma relação correta entre os componentes essenciais, dentro de condições racionais de operação e manejo. Os elementos que estejam

fixos de forma permanente devem ser projetados de maneira a - não poderem ser montados incorretamente, ou a não poderem ser recolocados erroneamente após manobras de limpeza ou outro tipo de serviço.

A construção e montagem em geral deve ter um acabamento limpo e um trabalho bem feito, com todas as partes bem encaixadas e todos os parafusos e porcas, ou outros meios de fixação, perfeitamente apertados, a fim de proporcionar a devida rigidez ao conjunto. Todos os cantos salientes com os quais o operador possa ter contato durante o manejo normal, ajuste ou limpeza devem ser arredondados, e as arestas devem ser desbastadas.

Quanto às regiões em que se utiliza solda, elas deverão ser submetidas a um posterior alívio de tensões. Os detalhes dos trabalhos de soldagem, técnicas relativas à mesma e a autorização do operário executante, devem ser controlados e - inspecionados cuidadosamente.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) Carl D. Shields; Boilers - Types, characteristics and - functions (McGraw-Hill Book Company, Inc. - New York, 1965)
- 2) Institute of Fuel; Waste-Heat Recovery (Chapman and Hall Ltd, 1963)
- 3) Ennio Ravaglia; Projeto de um Gerador de Vapor D'água - (DLP do Grêmio Politécnico, 1968)
- 4) Hildo Pera; Geradores de Vapor de Água (DLP do Grêmio Politécnico, 1968)
- 5) Remy Benedicto Silva; Manual de Termodinâmica e Transmissão de Calor (DLP do Grêmio Politécnico, 1979)
- 6) ASME; Boiler Code (American Society of Mechanical Engineers)
- 7) Gordon Van Wylen e Richard Sonntag; Fundamentos da Termodinâmica Clássica (Editora Edgard Blücher LTDA., 1978)

ANEXO

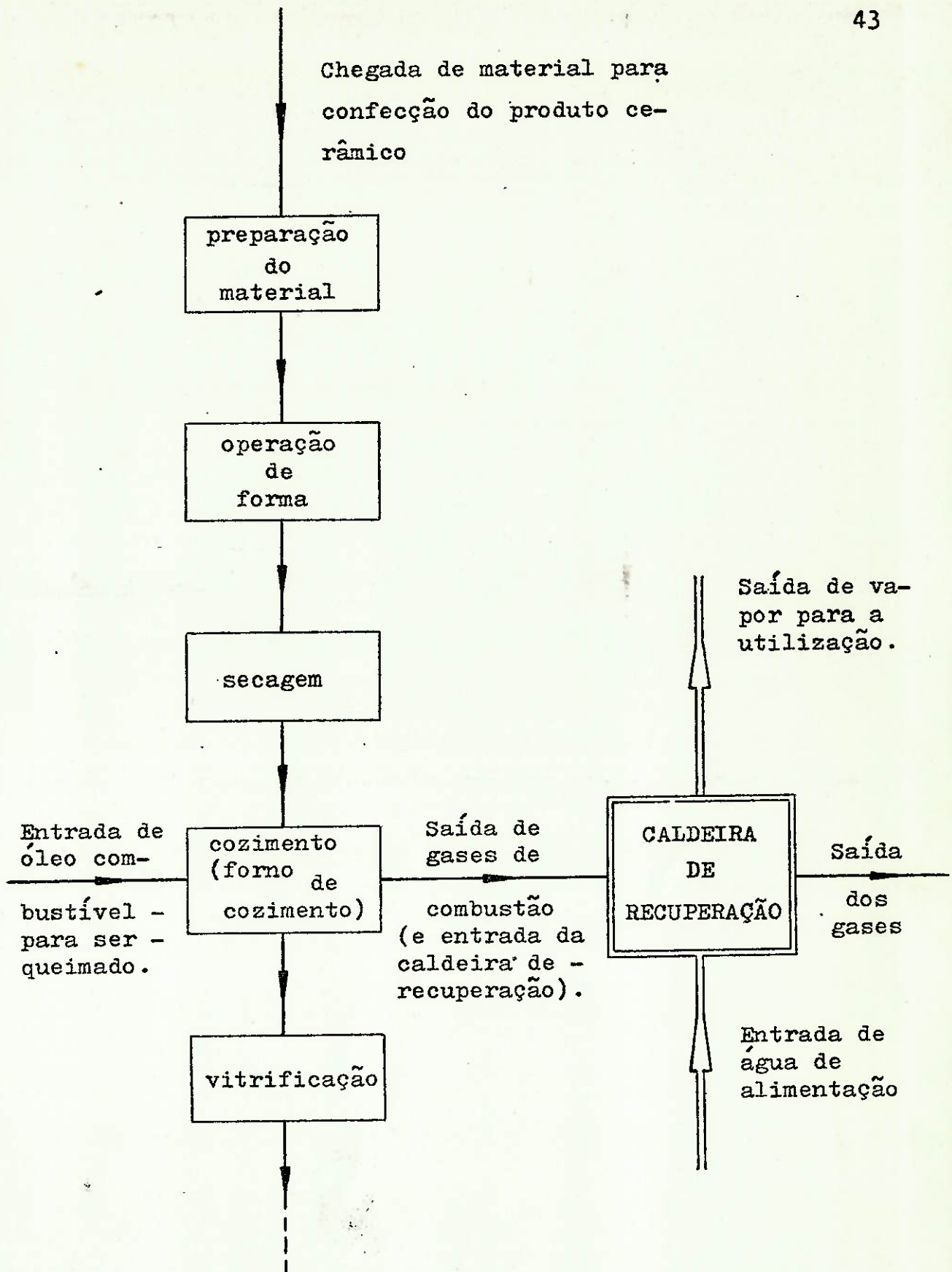


Figura 1: Fluxograma com a introdução de uma caldeira de recuperação no processo de uma indústria cerâmica fina.

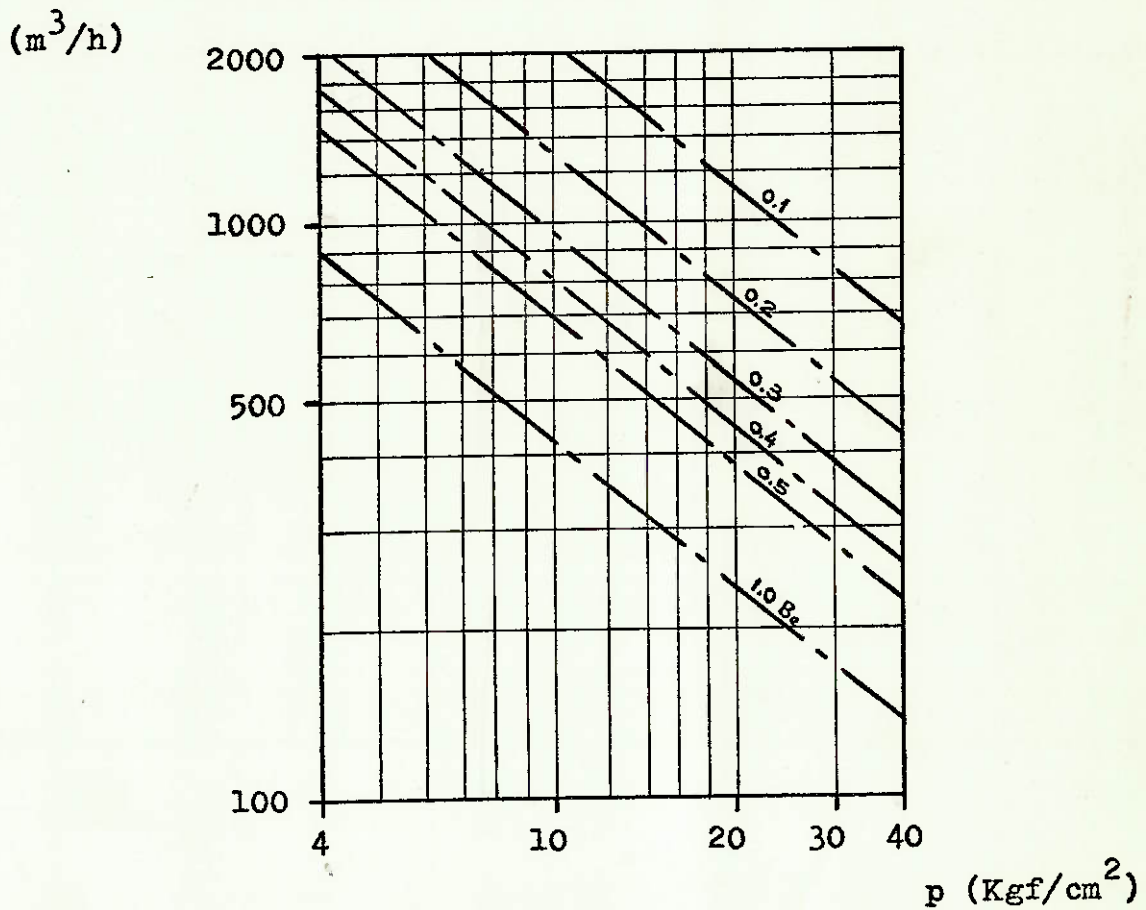


Figura 2: Produção de vapor ( $m^3/h$ ) que necessita de  $1 m^3$  de câmara de vapor, em função da pressão do vapor produzido (parametrizado pela concentração de sólidos totais)

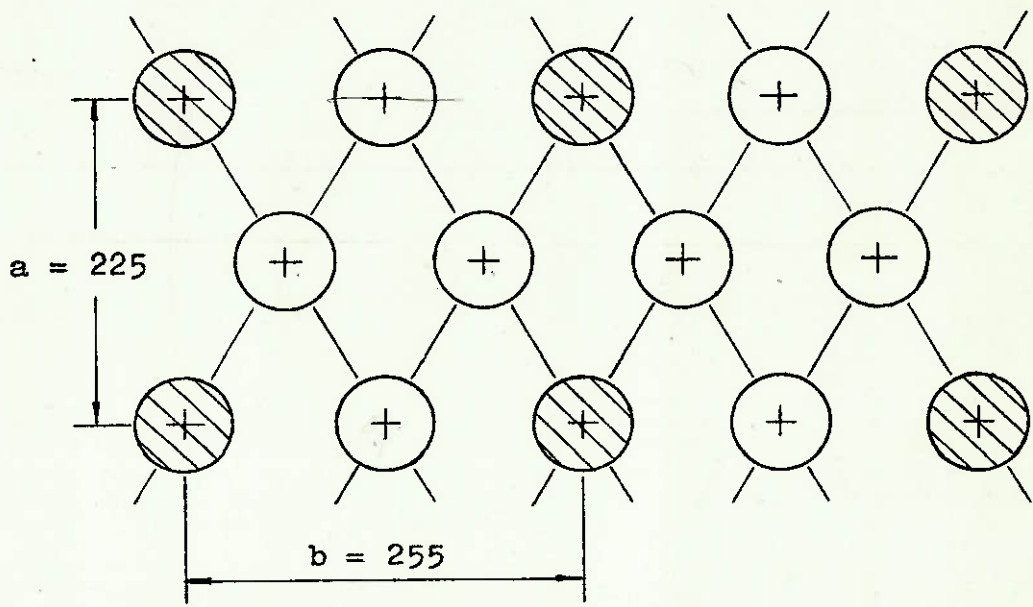
1900 - 114

93



Figura 3: Esquema representativo do corpo da caldeira, apresentando o nível d'água, a porta de inspeção e o modo de distribuição dos tubos. A região I representa a câmara de vapor, e a região II abriga os tubos da caldeira.

$\phi = 60 / 5 = 12$   
 $\frac{260}{20}$



4,5 lbs.  $\rightarrow$  0,0574 m<sup>2</sup>  
 36  $\rightarrow$  0,4550 m<sup>2</sup>  
 $\frac{\phi 1,5}{4} \rightarrow A = 0,7088 \text{ m}^2$

Figura 4: Disposição dos tubos tirantes, caracterizada pelas dimensões a e b.

*0,2498*



