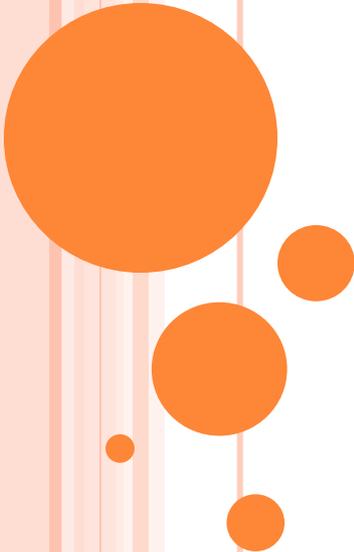




SISTEMAS TÉRMICOS DE POTÊNCIA

PROF. RAMÓN SILVA

A decorative graphic on the left side of the slide consisting of several orange circles of varying sizes, arranged in a vertical line with some overlapping.

Engenharia de Energia

Dourados MS - 2013

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

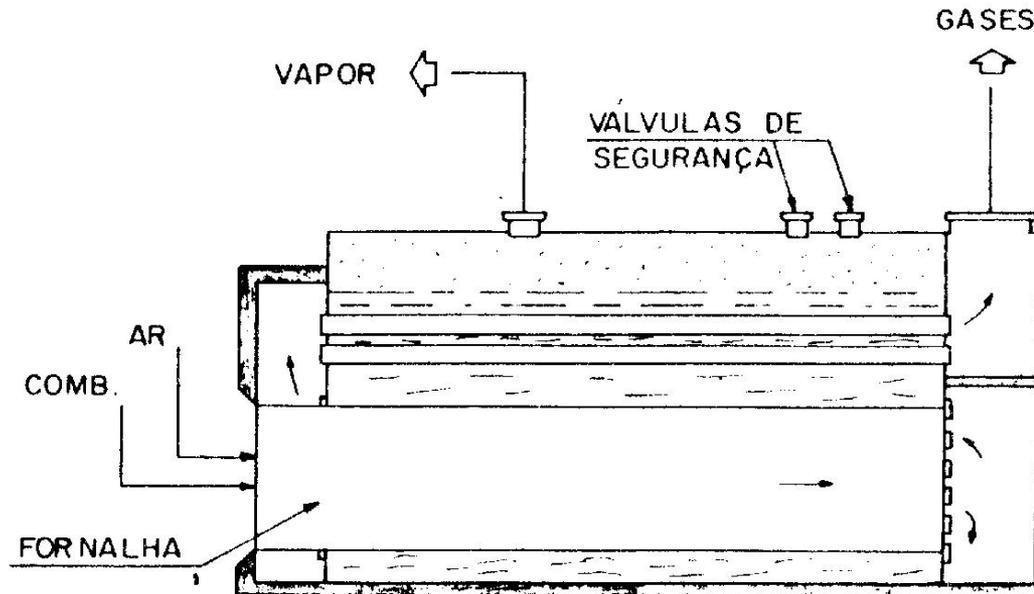


CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- As caldeiras flamotubulares, também conhecidas por tubos de fumaça são construídas de forma que a água circule ao redor do conjunto de tubos de transferência de calor, montados apoiados em placas de aço chamados espelhos, formando um feixe.
- Pelo interior desses tubos circulam os gases produtos da combustão.
- Essas caldeiras geralmente produzem vapor saturado.

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- A figura 1 mostra a água circundando a fornalha e os tubos de troca de calor e pelo lado interno da fornalha e dos tubos circula os gases da combustão.



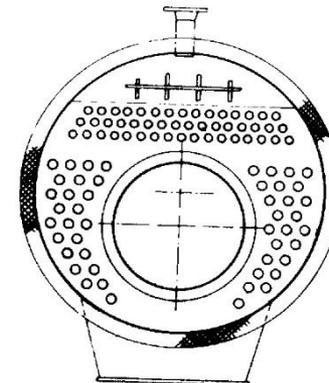
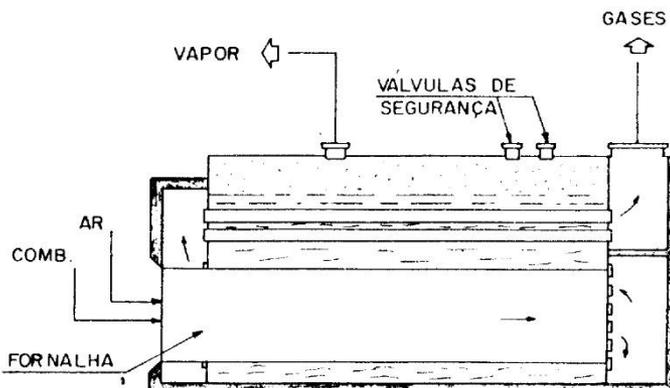


CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- **Passe ou passagem:** Os gases da combustão atravessam os tubos da caldeira por uma, duas ou três vezes.
- Esta passagem dos gases atravessando a caldeira pelo interior da fornalha ou dos tubos definem a caldeira através dos passes ou passagens.

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- A figura ilustra uma caldeira de três passes:
 - Um no interior da fornalha, indo até à câmara de reversão posterior,
 - outro, através dos tubos inferiores vindo da câmara de reversão posterior até à câmara de reversão anterior e,
 - o terceiro através dos tubos superiores indo da câmara de reversão anterior até à saída para o chaminé.



CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- **Taxa de vaporização específica:**
- É a produção de vapor por unidade de superfície de troca de calor dos tubos e fornalha. Nas caldeiras flamotubulares varia de 25 à 40 kg/m²h.

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- **Tipo de fornalha:** As caldeiras flamotubulares podem ser construídas com fornalhas internas, externas ou mistas.
- As fornalhas internas são mais apropriadas para combustíveis líquidos ou gasosos.
- Já as externas são mais apropriadas para combustíveis sólidos.
- As caldeiras de fornalhas mistas, são geralmente adaptações de caldeiras projetadas para combustíveis líquidos para queimarem alternativamente, combustíveis sólidos.

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- **Consumo de combustível:**
- As caldeiras flamotubulares movidas à BPF ou APF, consomem aproximadamente 0,075 kg de combustível para produzir 1 kg de vapor à 8 kgf/cm², partindo da água à 20 °C.
- Ou seja, produz 13,3 kg de vapor por quilo de combustível.



CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- **Rendimento:**
- É a razão entre a energia absorvida por cada quilo de água ao sair da fase líquida, na condição de entrada na caldeira, até alcançar a fase vapor saturado, na pressão de operação; e a energia fornecida à caldeira pelo combustível para produzir cada quilo de vapor.

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

○ Rendimento:

$$\eta_c = \frac{h_{v,p(oper.)} - h_{l,t(ent.)}}{PCI_{comb}} \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_{comb}}$$

- h_v = Entalpia do vapor saturado na pressão de operação.
- h_l = Entalpia do líquido saturado na temperatura de entrada.
- Taxa de produção de vapor
- \dot{m}_v = Taxa de consumo de combustível.
- PCI_{comb} = Poder Calorífico Inferior do combustível usado.

- As caldeiras flamotubulares apresentam rendimento na ordem de 84%.

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Tamanho das Caldeiras Flamotubulares:
- As caldeiras flamotubulares geralmente são dimensionadas para produzir vapor saturado seco , com pressão inferior à 15 Kgf/cm^2 e na taxa de vapor de 20.000 kg/h de vapor.
- Caldeiras flamotubulares com pressão e taxa de produção de vapor superior às mencionadas, não são recomendadas por implicarem em caldeiras de dimensões exageradas; sendo mais recomendável usar caldeiras aquatubulares.



CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- **Tamanho das Caldeiras Flamotubulares:**
- As caldeiras flamotubulares são muitas vezes chamadas de caldeiras compactas porque são montadas sobre um chassi onde são fixados todos os dispositivos necessário para o seu funcionamento com segurança.
- Para colocá-la em funcionamento, basta ligá-la à rede de energia elétrica, de combustível e de distribuição de vapor.

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- As caldeiras Flamotubulares apresentam como vantagens:
 - Baixo custo.
 - Construção simples.
 - Facilidade de manutenção.
 - Exigir pouca alvenaria.
 - Ser bastante reforçada.



CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

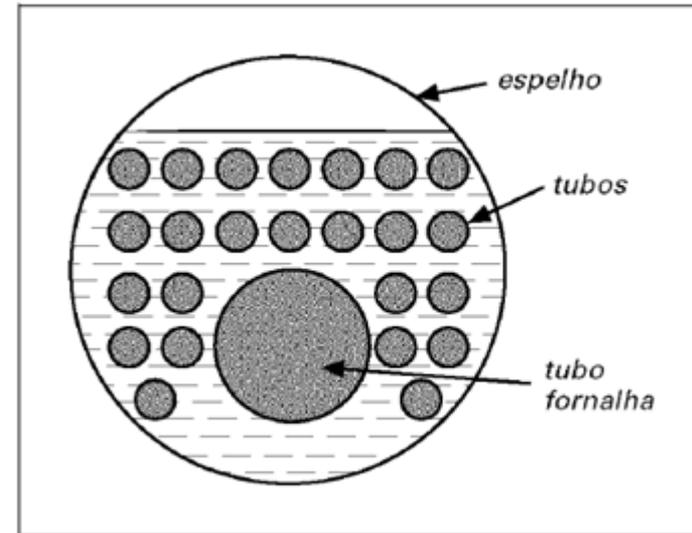
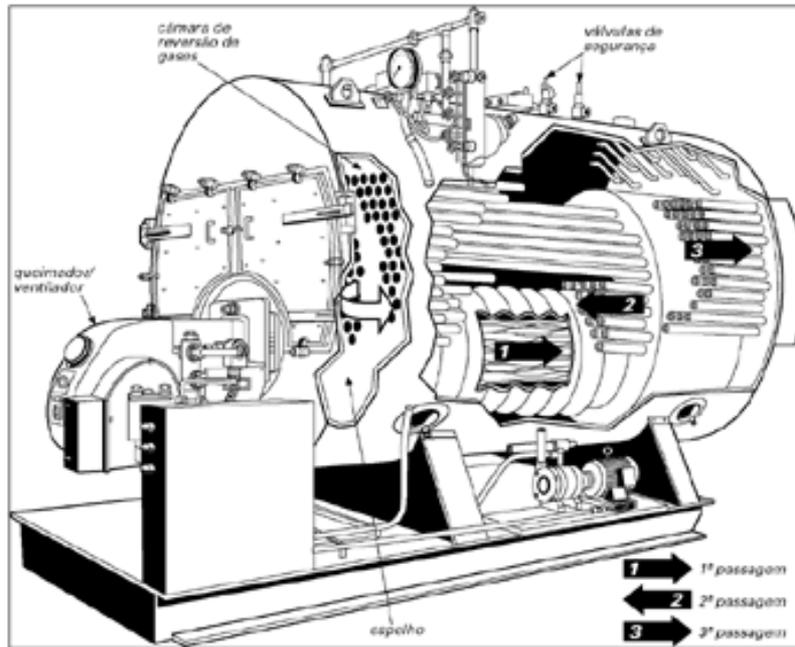
- Apresentam como desvantagens:
 - Rendimento inferior às caldeiras aquotubulares.
 - Demora para atingir o ponto de operação, devido o grande volume de água que acumula.
 - Pressão limitada em aproximadamente 15 Kgf/cm^2 .
 - Pequena taxa de vaporização específica.
 - Dificuldade para instalação de economizador e superaquecedor.



CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- **Corpo das Caldeiras Flamotubulares:** As partes essenciais de uma caldeira flamotular são:
 - Corpo cilíndrico externo (casco).
 - Fornalha.
 - Tubos.
 - Espelho frontal.
 - Espelho traseiro.
 - Câmara de reversão frontal.
 - Câmara de reversão traseira.
 - Trapézio.
 - Câmara de saída dos gases.

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES





CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- O corpo cilíndrico externo tem diâmetro que pode variar entre 900 e 2800 mm.
- O material usado no corpo cilíndrico de caldeiras deve estar em conformidade com a ASME Boiler and Pressure Vessel Code

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- O ASME Boiler and Pressure Vessel Code - Section I - Power Boilers – Part PG, recomenda as seguintes fórmulas para cálculo dos cascos de vasos de pressão

$$e = \frac{PR}{0.8SE - 0,6P} + C$$

- e = espessura mínima para pressão interna, mm.
- R = raio interno do cilindro, mm.
- P = pressão interna de projeto, MPa.
- S = tensão admissível básica do material, MPa.
- E = coeficiente de eficiência de solda, como explicado mais adiante.
- C = Sobre espessura para prevenir corrosão e/ou para erosão ou usinagem, mm.



CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- O código ASME Boiler and Pressure Vessel Code, estabelece que os vasos destinados a vapor, água ou ar comprimido, com espessura calculada de parede inferior a 6mm, tenham uma sobre espessura de no mínimo $1/6$ da espessura.

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- A Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) dos cascos cilíndricos de pequena espessura é dada pela fórmula:

$$P = \frac{0,8SEe}{R + 0,6e}$$

- Nestas expressões a espessura e e a tensão admissível S terão os valores correspondentes à condição para a qual PMTA estiver sendo calculada.
- A tensão admissível básica do material (S), é função da temperatura de projeto do vaso. A tensão admissível é obtido na tabela UCS-23 do código ASME VIII - Divisão I.



CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- O ASME Boiler and Pressure Vessel Code - Section I - Power Boilers – Part PTF diz que as espessuras mínimas do casco e domo após conformados, devem ser as seguintes:

Diâmetro interno do casco, em mm.	Espessura mínima, em mm.
Abaixo de 915	6,4
De 915 até 1.375	8,0
De 1.375 até 1.825	9,6
Acima de 1.825	12,7

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- O ASME Boiler and Pressure Vessel Code - Section I - Power Boilers – Part PG, no item PG 27.4 diz que para caldeira, E = Eficiência de juntas soldadas longitudinais ou de ligamentos entre aberturas, o que for menor:
 - $E = 1$; para cilindros sem costura.
 - $E = 1$; para juntas soldadas com todos os reforços de soldas nas juntas longitudinais removidos rentes à superfície da placa.
 - $E = 0,90$; para juntas soldadas com os reforços de soldas nas juntas longitudinais abandonados no local.
 - $E =$ dados tirados do gráfico no item PG-53 para ligamentos entre abertura.



CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- A tabela a seguir fornece um resumo da tabela UW-12 para o Coeficiente da Eficiência de Solda (E) em vasos de pressão.
- Para cilindros sem costura $E = 1,0$.
- Esses coeficientes destinam-se a compensar os possíveis defeitos na solda e na região termicamente afetada pela solda.

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

<u>TIPO DE SOLDA</u>	<u>LIMITAÇÕES</u>	<u>GRAU DE INSPEÇÃO QUE O VASO SERÁ SUBMETIDO</u>		
		Radiografia total	Radiografia Parcial por amostragem	Não Radiografada
Solda de topo, feita por ambos os lados, ou por procedimento equivalente, de forma a obter penetração e fusão total. (excluem-se as soldas com mata-junta permanente).	<u>Nenhuma</u>	1,00	0,85	0,70
Solda de topo, feita por um só lado, com mata-junta permanente.	<u>Nenhuma</u>	0,90	0,80	0,65
Solda de topo, feita por um só lado, sem mata-junta.	<u>Uso permitido somente para soldas circunferenciais, para espessuras inferiores a 15mm, e diâmetros inferiores a 610mm.</u>	—	—	0,60
Solda sobreposta, com filete duplo de altura total.	<u>Uso permitido para soldas Longitudinais em espessuras inferiores a 15mm, e diâmetros inferiores a 610mm.</u>	—	—	0,55



CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Fornalha
- O ASME Boiler and Pressure Vessel Code - Section I - Power Boilers – Part PFT.14, diz que a espessura das fornalhas cilíndricas planas não pode ser inferior a 8 mm. A máxima pressão de trabalho permitida (PMTP), deve ser determinada como indicado a seguir.



CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Nas fórmulas deste item, teremos as seguintes definições:
 - P = Pressão Máxima de Trabalho Permitida (PMTP), em MPa.
 - D = Diâmetro externo da fornalha, mm.
 - L = Comprimento total da fornalha, mm.
 - e = Espessura mínima da fornalha, mm.

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Para fornalhas com Diâmetro Externo até 152 mm:

$$P = 96,5 \frac{(e - 1,65)}{D}$$

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Para fornalhas com Diâmetro Externo de 152 mm à 460 mm e que o comprimento da fornalha não ultrapasse 4,5 vezes o diâmetro (para $L < 120e$)

$$P = \frac{0,355}{D} (300e - 1,03L)$$

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Quando L for maior que 120 vezes a espessura, usamos:

$$P = \frac{7500e^2}{LD}$$

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Para fornalhas com Diâmetro Externo de 152 mm à 460 mm e que o comprimento da fornalha é superior a 4,5 vezes o diâmetro (para $e < 0,023D$)

$$P = \frac{68900e^3}{D^3}$$

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Quando a espessura for maior que $0,023D$, usamos:

$$P = \frac{119,28e}{D} - 1,90$$

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Para fornalhas com Diâmetro de 460 mm(externo) a 970 mm(interno) e que o comprimento da fornalha não exceda 6 vezes o diâmetro (para $L < 120e$):

$$P = \frac{0,355}{D} (300e - 1,03L)$$

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Quando L for maior que 120 vezes a espessura, usamos:

$$P = \frac{7500e^2}{LD}$$

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Para fornalhas com Diâmetro de 460 mm(externo) a 970 mm(interno) e que o comprimento da fornalha é superior à 6 vezes o diâmetro (para $L < 120e$):

$$P = \frac{0,355}{D} (300e - 6,18L)$$

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Quando L for maior que 120 vezes a espessura, usamos:

$$P = \frac{7500e^2}{6D^2}$$

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Tubos
- O ASME Boiler and Pressure Vessel Code - Section I - Power Boilers – Part PFT.12, recomenda que a Pressão Máxima de Trabalho Permitida para Tubos de aço em caldeira seja determinada por

$$P = 96,5 \frac{(e - 1,65)}{D}$$

- P = Pressão Máxima de Trabalho Permitida(PMTP), em MPa.
- e = Espessura mínima da parede do tubo, mm.
- D = Diâmetro externo do Tubo, mm.



CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Tubos
- Para Tubos de cobre em caldeira, O ASME Boiler and Pressure Vessel Code - Section I - Power Boilers – Part PFT.12, recomenda que a Pressão Máxima de Trabalho(PMTP) seja determinada por:

$$P = 82,7 \frac{(e - 1,0)}{D} - 1,72$$

- P = Pressão Máxima de Trabalho Permitida(PMTP), em MPa.
- e = Espessura mínima da parede do tubo, mm.
- D = Diâmetro externo do Tubo, mm.



CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- As fórmulas citadas anteriormente, visam dar uma visão panorâmica das recomendações do Código ASME para caldeiras e vasos de pressão.
- O assunto é muito extenso e complexo. Portanto, recomendamos uma consulta mais profunda do ASME Boiler and Pressure Vessel Code, pois existem inúmeras particularidades não abordadas nesta apostila.

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Do ponto de vista de segurança é importante notar que as determinações da espessura mínimas de uma parede para resistir uma determinada pressão, são feitas através de fórmulas que trazem no numerador o produto PD (P = Pressão de operação e D = O diâmetro do vaso) e no denominador a tensão admissível do material S . Ou seja,

$$e = f \left(\frac{PD}{S} \right)$$



CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- Assim, quanto maior a pressão de operação maior a espessura para resisti-la.
- Quanto maior o diâmetro do vaso, maior deve ser a espessura para resistir a mesma pressão e quanto maior a tensão admissível do material, menor é a espessura necessária.



CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- É importante notar que a tensão admissível do material cai com o aumento de temperatura à qual ele está submetido.
- Portanto, o superaquecimento de parte sujeitas a pressão é a grande causa de explosões visto que a espessura teria sido calculada para temperaturas menores.



CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

- **PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE ALGUMAS CALDEIRAS FLAMOTUBULARES DE FABRICAÇÃO ATA.**

COMBUSTÃO A ÓLEO COMBUSTÍVEL BPF OU APF						
CALDEIRA	UNID.	ATA-18	ATA-20	ATA-22	ATA-24	ATA-26
Superfície de aquecimento	m ²	100	124	148	170	200
Produção de vapor –água 20 °C	Kg/h	3300	4000	4800	5500	6500
Produção de vapor –água 80 °C	Kg/h	3600	4400	5280	6050	7150
Consumo máximo de óleo	Kg/h	250	310	373	430	500
Volume de água na caldeira	m ³	5,3	5,9	7,6	8,4	8,5



BIBLIOGRAFIA

Santos, A. M, Apostila de Máquinas Térmicas, Universidade de São Paulo, São Carlos 2012