

Geradores de Vapor

4º ano

Aula 10

Dimensionamento de Fornalhas Aquatubulares

- Tópicos
 - Princípios Gerais do Projecto
 - Determinação das dimensões da fornalha de uma caldeira
 - Tensões térmicas na fornalha
 - Emissividade da Chama



Princípios Gerais do Projecto

Uma fornalha típica de uma caldeira a combustível líquido ou a carvão pulverizado é delimitada por uma parede refrigerada a água, conhecida como *parede de água*. Um conjunto de queimadores queima o combustível que irradia calor para as paredes ou para a fornalha. Algumas fornalhas de caldeiras também acomodam superfícies de aquecimento adicionais, tais como as superfícies do superaquecedor ou reaquecedor. Estas superfícies arrefecem os produtos de combustão que saem da fornalha até uma temperatura adequada para as superfícies de troca de calor a jusante, na parte traseira da caldeira ou secção convectiva.



Princípios Gerais do Projecto

Os requisitos gerais para as fornalhas de caldeiras, independentemente do seu método de queima são os seguintes:

- I) A fornalha deve fornecer o ambiente físico adequado e o tempo necessário para completar a combustão do combustível;
- II) A fornalha deve ter suficientes superfícies de aquecimento radiante para arrefecer convenientemente o gás de combustão assegurando uma operação segura das superfícies de aquecimento convectivo a jusante;
- III) A aerodinâmica da fornalha deve evitar o choque das chamas com a parede de água e assegurar uma distribuição uniforme do fluxo de calor pelas paredes de água;
- IV) A fornalha deve fornecer condições que favoreçam a circulação natural fiável da água através dos tubos de parede de água;
- V) A configuração da fornalha deve ser suficientemente compacta para minimizar a quantidade de aço e outros materiais utilizados na sua construção.



Determinação das dimensões da fornalha de uma caldeira

A forma da fornalha depende de vários factores, como a forma da chama, o método de aquecimento e a disposição dos queimadores. A forma típica de uma fornalha de queima de carvão pulverizado (CP) com um fundo seco apresenta-se na Figura 10.1. Ao dimensionar uma fornalha, o projectista necessita de definir as fronteiras da mesma. Estes limites são definidos pela linha central do plano da parede de tubos de água e do teto, as linhas centrais dos tubos da primeira linha do sobreaquecedor ou da tela de escória, e o plano horizontal que passa através da metade da altura da tremonha das cinzas. As dimensões típicas de uma caldeira de CP são dadas a seguir, com referência à Figura 10.1 (Lin, 1991).



Determinação das dimensões da fornalha de uma caldeira

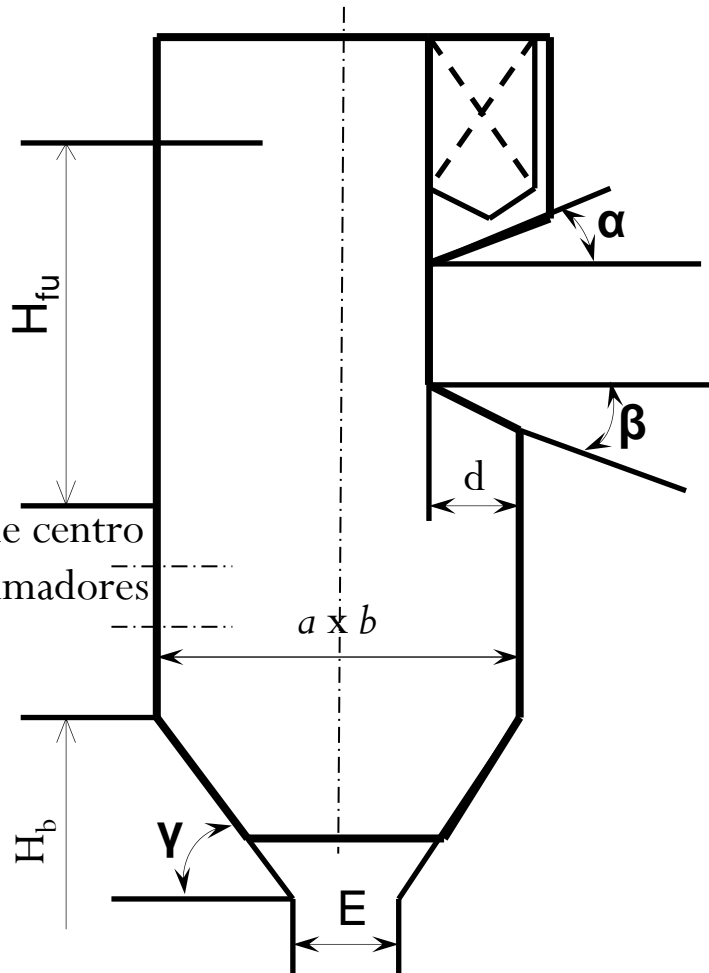


Figura 10.1 Dimensões típicas de uma fornalha



Determinação das dimensões da fornalha de uma caldeira

Para fornalhas não arrefecidas, refractárias ou revestidas, a fronteira da fornalha é definida pela superfície da parede da fornalha. Se a parte inferior da fornalha for horizontal, o seu limite inferior é a soleira do forno. Em caldeiras com grelha mecânica o volume eficaz da fornalha exclui o volume da camada de combustível.

A área projectada da superfície da parede de água, F , é a área do plano que define o limite do volume eficaz da fornalha. Assim, a área efectiva da secção projectada entre dois tubos da parede de água é calculada de:

$$F = p \cdot l \quad [m^2] \quad (10.1)$$

Em que l é o comprimento (ou altura) da parede de água e p é o passo ou distância entre dois tubos adjacentes da parede de água.



Determinação das dimensões da fornalha de uma caldeira

Na fornalha de uma caldeira a radiação recebida por um tubo não é uniforme ao longo da sua secção transversal. Além disso, por vezes, a parede da fornalha não é completamente coberta por tubos. Assim, para simplificar os cálculos de transferência de calor, a superfície que absorve calor de radiação é considerada uma superfície plana contínua com a absorção de calor igual a uma superfície limpa sem tubos. Em vez da área da superfície efectiva da parede projetada, F , é usada uma área de superfície eficaz absorvedora de calor radiante S_{ef} multiplicando a área anterior por um coeficiente angular, x .

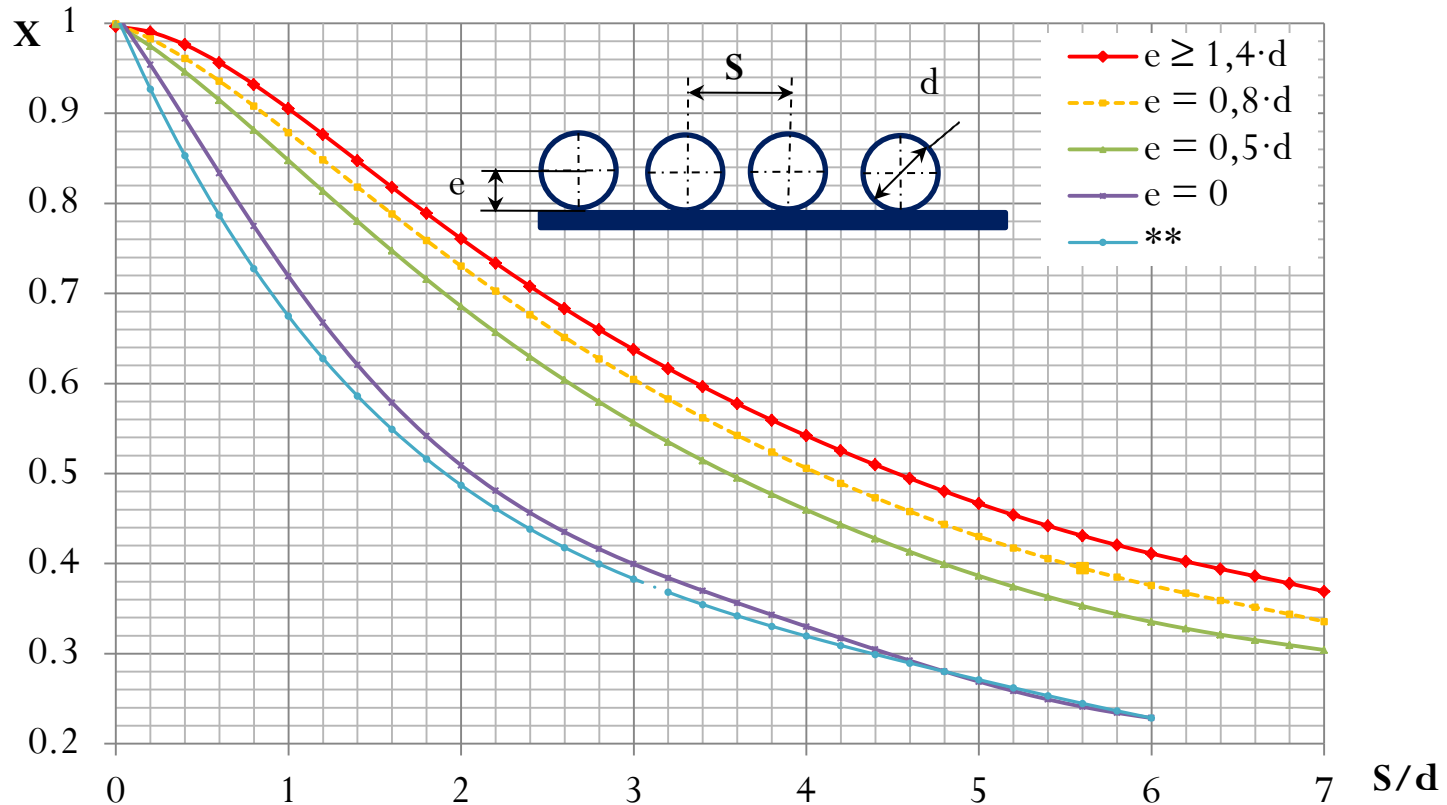
$$S_{ef} = \sum F \cdot x \quad [m^2] \quad (10.2)$$

Determinação das dimensões da fornalha de uma caldeira

O coeficiente angular, x , de tubos localizados diante da parede da fornalha depende do seu passo, p , e da sua distância da parede refractária (Figura 10.2). O coeficiente angular também toma em conta a radiação a partir da parede refractária por trás dos tubos. Para uma parede de água do tipo membrana, onde os tubos se tocam, $x = 1,0$. Para superaquecedores pendulares de tela e feixes de tubos da caldeira, $x = 1,0$. Para seções da parede da fornalha sem paredes de água, como a zona do queimador e da portinhola, $x = 0$.



Determinação das dimensões da fornalha de uma caldeira



** - Quando não se toma em consideração a radiação das paredes

Figura 10.2. Ábaco para a determinação do coeficiente angular

Projecção de uma fornalha

Existem dois aspectos a ter em conta na concepção de uma fornalha. O primeiro está relacionado com a geração de calor enquanto o segundo refere-se à absorção de calor na fornalha. O primeiro aspecto assegura que a quantidade de combustível calculada possa ser queimada no volume dado da fornalha libertando a quantidade necessária de calor. Os projectos práticos baseiam-se numa taxa de queima admissível, que depende de um certo número de factores. O segundo aspecto assegura que as paredes de água da fornalha absorvam a quantidade requerida do calor gerado. No caso de caldeiras a carvão pulverizado isto envolve uma análise complexa de transferência de calor a qual é a seguir apresentada:



Projecção de uma fornalha

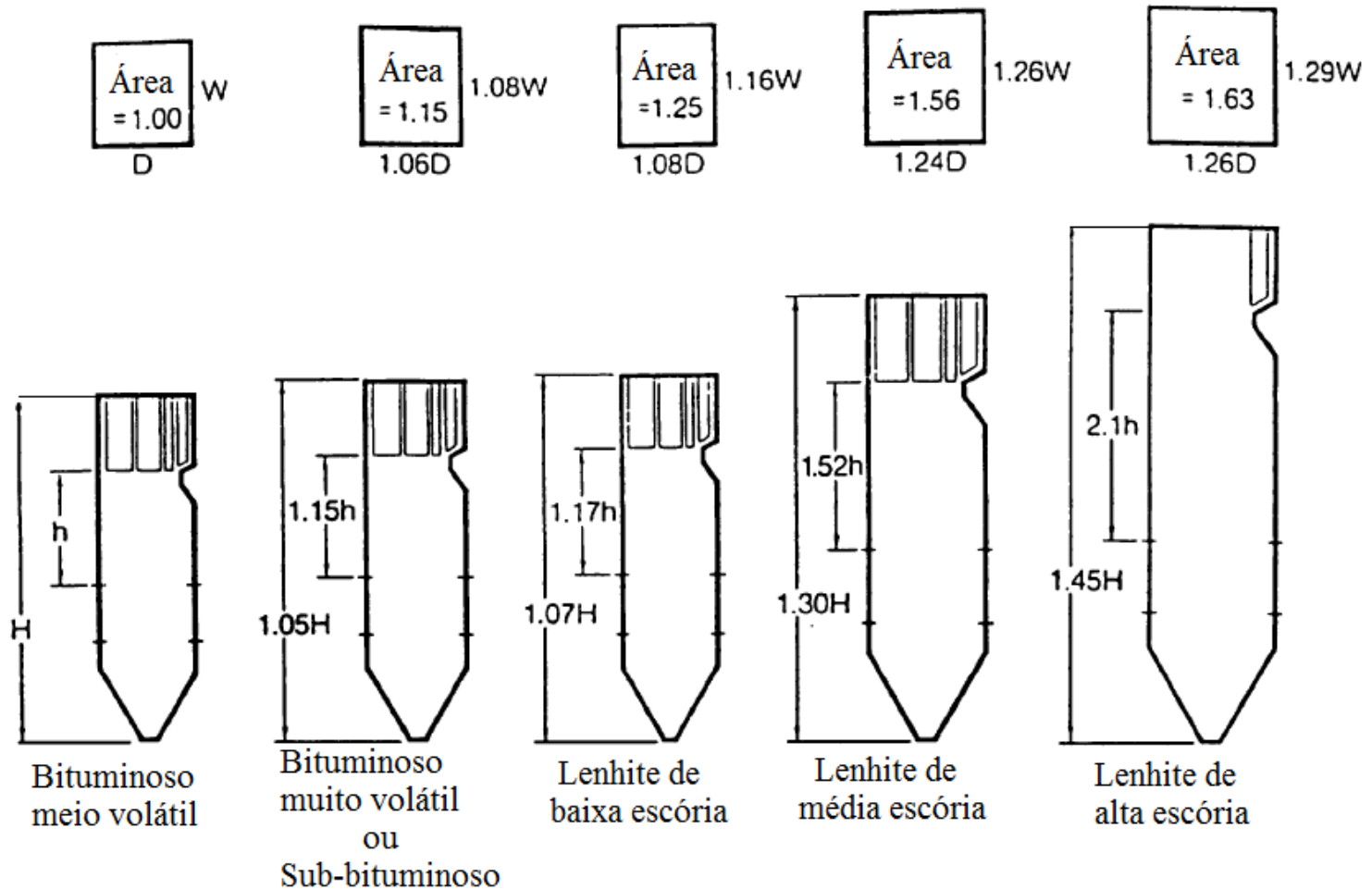


Figura 10.3 Efeito do tipo de carvão no tamanho da fornalha de CP para uma potência de aquecimento constante

Taxas de Queima em Fornalhas

As taxas de libertação de calor e a temperatura de saída do gás da fornalha são alguns dos parâmetros importantes utilizados para o projecto do tamanho da fornalha. Ao contrário do volume em fornalhas de leito fluidizado, o volume de uma fornalha a carvão ou a combustível líquido é bastante influenciada pelo tipo de combustível queimado. Para cada tipo de combustível, há uma taxa de libertação de calor especificada. A área da secção transversal da fornalha e a sua altura são influenciadas pelo tipo do combustível. A Figura 10.3 mostra como o tamanho da fornalha e a sua forma variam para diferentes tipos de carvão embora a entrada de calor seja a mesma.

As tensões térmica podem ser expressas em três bases diferentes, volume da fornalha (q_v), área da secção transversal (q_F) e área de parede de água na região do queimador (q_q).



Tensão Térmica Volumétrica, q_v

A tensão térmica volumétrica (q_v) é a quantidade de calor gerado pela combustão do combustível, por uma unidade eficaz do volume da fornalha. Ela é dada por:

$$q_v = \frac{BQ_i}{V_f} \quad \left[\frac{kW}{m^3} \right] \quad (10.3)$$

Onde

B – é o consumo de combustível

Q_i – o poder calorífico inferior

q_v – a tensão térmica volumétrica

V_f – é o volume da fornalha



Tensão Térmica Volumétrica, q_v

A escolha apropriada da taxa volumétrica de libertação de calor assegura que:

- As partículas de combustível sejam substancialmente queimadas;
- O gás de combustão seja arrefecido até à temperatura segura exigida antes de sair do forno. Esta temperatura, que é conhecida temperatura de saída do gás de combustão da fornalha (TSGF) é crítica para a operação segura das superfícies dos permutador de calor a jusante.

Para as caldeiras de pequena capacidade (<220 t/h vapor) uma tensão térmica volumétrica, escolhida com base na combustão completa do combustível, encontra-se próxima da escolhida com base no arrefecimento dos produtos de combustão.



Tensão Térmica Volumétrica, q_v

Nas caldeiras de grande capacidade o aumento da área das paredes da fornalha não acontece na mesma proporção do aumento do volume da fornalha. Por exemplo, se a capacidade da caldeira for duplicada, a altura da fornalha não pode ser duplicada, devido ao custo a isso associado. Portanto, a área disponível das paredes da fornalha não será o dobro. A tensão térmica volumétrica também depende das características das cinzas, do método de queima e da disposição dos queimadores. Alguns valores típicos de q_v são apresentados na Tabela 10.1.



Tensão Térmica Volumétrica, q_v

Tabela 10.1 valores típicos da tensão volumétrica de calor (q_v) em MW/m³

Tipo de Combustível	Fornalha com fundo seco q_v (MW/m ³)	Fornalha com retirada de escória pelo fundo q_v (MW/m ³)		
		Fornalha aberta	Fornalha meio-aberta	Fornalha com depósito de cinzas
Antracite	0,110-0,140	≤ 0,145	≤ 0,169	0,523-0,598
Semi-Antracite	0,116-0,163	0,151-0,186	0,163-0,198	0,523-0,698
Betuminoso	0,140-0,200	-	-	-
Comb. Líquido	0,230-0,350	-	-	-
Lenhite	0,090-0,150	≤ 0,186	≤ 0,186	0,523-0,640
Gás	0,350	-	-	-



Tensão Térmica por Unidade de Área, q_F

A Tensão Térmica por Unidade de Área é a quantidade de calor libertado por unidade de secção transversal da fornalha. Também é às vezes chamada taxa de libertação de calor da grelha. Ela é dada por:

$$q_F = \frac{BQ_i}{F} \quad \left[\frac{kW}{m^2} \right] \quad (10.4)$$

Onde F é a área da secção transversal ou da grelha da fornalha, m^2 .

A tensão térmica, q_F , reflecte até certo ponto, a temperatura na fornalha.

Quando aumenta o q_F , a temperatura na região do queimador sobe, o que ajuda na estabilidade da chama mas, isso aumenta a possibilidade de formação de escória na fornalha.

Tensão Térmica por Unidade de Área, q_F

Para caldeiras pequenas (capacidade de vapor $D \leq 220$ t/h), não é essencial o teste de q_F , porque a área da secção transversal da fornalha, em comparação com o seu volume, é muito grande. Este não é o caso das caldeiras de grande capacidade, em que q_F deve ser criteriosamente escolhido. Assim, ele depende da capacidade da caldeira e da temperatura de amolecimento (ST) do combustível. Valores típicos dos limites superiores de q_F são apresentados na Tabela 10.2 para uma ampla gama de carvão em caldeiras de capacidade até 1500 t/h. Para além desta capacidade q_F altera-se de forma insignificante. O volume da fornalha pode ser determinado, a partir do valor escolhido de q_v , enquanto a altura da fornalha, é calculada pela q_F .



Tensão Térmica por Unidade de Área, q_F

Tabela 10.2 Limite superior da tensão térmica por unidade de área para fornalhas com queimadores tangenciais (q_F) em MW/m^2

Capacidade do Gerador (t/h)	Limite superior de q_F em (MW/m^2)		
	$ST \leq 1300^\circ\text{C}$	$ST = 1300^\circ\text{C}$	$ST \geq 1300^\circ\text{C}$
130	2,13	2,56	2,59
220	2,79	3,37	3,91
420	3,65	4,49	5,12
500	3,91	4,65	5,44
1000	4,42	5,12	6,16
1500	4,77	5,45	6,63



Tensão Térmica por unidade de superfície da parede da região do Queimador (q_q)

A região da fornalha onde se encontram os queimadores é a zona de calor mais intenso. Portanto, esta área é projetada separadamente usando-se um terceiro tipo de tensão térmica, q_q chamada tensão térmica na zona do queimador. Ela baseia-se na área das paredes de água na região dos queimadores e é definida por:

$$q_q = \frac{BQ_i}{2(a+b)H_q} \left[\frac{kW}{m^2} \right] \quad (10.5)$$

Onde a e b são a largura e o comprimento da fornalha, respectivamente, e H_q é a distância entre o topo do queimador superior e a borda inferior do queimador inferior, em metros.



Tensão Térmica por unidade de superfície da parede da região do Queimador (q_q)

O Parâmetro q_q representa o nível da temperatura e o fluxo de calor na região do queimador. Este parâmetro adicional é muitas vezes utilizado para avaliar a condição geral da região dos queimadores de uma grande caldeira. Isso depende das características de ignição do combustível, da cinza, do método de queima, e da disposição dos queimadores. Alguns valores recomendados de q_q são apresentados na Tabela 10.3.



Tensão Térmica por unidade de superfície da parede da região do Queimador (q_b)

Tabela 10.3 Valores recomendados de Tensão Térmica por unidade de superfície da parede da região do queimador (q_b) em MW/m^2

Combustível	q_b em MW/m^2
Carvão de pedra	0,93-1,16
Antracite e Semi-antracite	1,40-2,10
Lenhite	1,40-2,32



Comprimento da Fornalha

As tensões térmicas ajudam a determinar o volume, bem como a área da secção transversal da fornalha. Elas no entanto não definem a relação entre o comprimento e a largura da fornalha, que é um parâmetro importante, tanto do ponto de vista de combustão, como do de absorção de calor. Por exemplo, numa fornalha a carvão muito estreita (relação entre o comprimento e a largura pequena), a chama que vem da parede frontal pode chegar à parede oposta, o que danifica gravemente os tubos de água. Assim, para uma dada secção transversal da fornalha, a razão entre o comprimento e a largura da fornalha deve ser calculada a fim de evitar esta possibilidade. Há, no entanto, um valor mínimo admissível do comprimento da fornalha, b_{\min} , que depende da capacidade da caldeira e do tipo de combustível queimado (Tabela 10.4).



Comprimento da Fornalha

Tabela 10.4 Valores recomendados de Tensão Térmica por unidade de superfície da parede da região do queimador (q_q) em MW/m²

Capacidade do Gerador (t/h)	130	220	420	670.3	>670
Carvão	6,0	7,0	7,5	8,0	$\geq(5-6) d_r^a$
Combustível líquido	5,0	5,0	6,0	7,5	

d_r^a - diâmetro máximo do bocal do queimador turbulento



Comprimento da Fornalha

A disposição dos queimadores, a taxa de geração de calor por unidade de área do forno, a saída de energia de cada queimador e o comprimento da chama, são alguns dos factores que influenciam na largura e no comprimento da fornalha, em especial, quando são utilizados queimadores turbulentos.

Numa fornalha com queimadores nos cantos, em que os queimadores estão localizados nos quatro cantos, uma relação entre largura e o comprimento (a/b) menor do que 1,1-1,2 pode assegurar bons padrões do fluxo dentro da fornalha.



Comprimento da Fornalha

Ao escolher-se o comprimento, b , a velocidade dos produtos de combustão no trajecto de convecção e a velocidade do vapor no sobreaquecedor também devem ser tomados em conta. A mistura de vapor e água aumenta também no interior dos tubos das paredes de água da fornalha. Assim também na fornalha deve-se também considerar a velocidade do vapor de água nestes tubos. É especialmente importante para caldeiras com pressões acima de 9,8 MPa.



Altura da fornalha.

A fornalha deve ser suficientemente alta de modo que a chama não atinja os tubos do superaquecedor. A distância mais curta (H_{fu}) entre o queimador e qualquer superfície de aquecimento é a distância vertical entre a linha do centro dos queimadores mais altos até o ponto médio da saída da fornalha (Fig. 10.1).

Assim, esta altura deve ser superior a um valor mínimo, de acordo com o tipo de carvão usado e a capacidade da caldeira.

Quanto mais curta a altura da fornalha, pior a circulação natural. Assim também é necessário garantir uma altura mínima da fornalha para o necessário grau de circulação natural. Alguns valores típicos são apresentados na Tabela 10.5 para uma caldeira a carvão de fundo seco.



Tensão Térmica por unidade de superfície da parede da região do Queimador (q_b)

Tabela 10.5 Valores recomendados da altura mínima H_{fu} em metros

Capacidade do Gerador de vapor (t/h)	65-75	130	220	420	670
Antracite	8	11	13	17	18
Lenhite Betuminosa	7	9	12	14	17
Combustível Líquido	5	8	-	-	-



Temperatura da saída do gás da fornalha, T_{sai}

A temperatura de saída do gás de combustão da fornalha (TSGF) é um parâmetro importante de projecto. Ele define a relação entre a absorção de calor pelas superfícies de aquecimento radiantes da fornalha e as superfícies de aquecimento por convecção a jusante da fornalha. Este parâmetro é regido por dois factores, de ordem técnica e económica. Uma maior TSGF torna a fornalha mais compacta, mas a seção de convecção maior o que também aumenta a probabilidade de depósitos de fuligem nos tubos. Estas considerações dão o valor óptimo da temperatura de saída do gás da fornalha, na gama entre 1200 °C a 1400 °C.



Temperatura da saída do gás da fornalha, T_{sai}

À saída da fornalha a temperatura real é muitas vezes mantida abaixo do valor óptimo, para impedir a formação de incrustações nas superfícies de aquecimento convectivo. Para caldeiras sem sobreaquecedores planos a temperatura de saída é a temperatura do gás de combustão a entrar nos tubos de tela.

A TSGF é escolhida ligeiramente abaixo da temperatura de deformação de cinzas (DC). Caso contrário, haveria grave obstrução por cinzas fundidas nos ductos de passagem traseira. Se a diferença entre a temperatura de deformação das cinzas (DC) e a temperatura de amolecimento (TA) for menor do que $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, a TSGF deverá ser inferior a $(DC - 100)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para as caldeiras com sobreaquecedores de tela, a temperatura dos produtos de combustão à jusante do superaquecedor de tela deve ser menor do que $(DC - 50)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $(TA - 150)\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Temperatura da saída do gás da fornalha, T_{sai}

A temperatura a montante do sobreaquecedor de tela deve ser inferior a 1250 °C para o carvão com fraca propensão de formação de escórias. Para carvão com fortes e moderadas propriedades de escorificação, esta temperatura deve ser inferior a 1110 °C e 1200 °C, respectivamente.

A chama de combustíveis líquidos produz quantidades muito menores de cinza do que a do carvão. Assim, a temperatura dos produtos de combustão de uma fornalha a combustível líquido, pode ser mais elevada do que para caldeiras alimentadas a carvão. A TSGF de fornalhas de combustível líquido é no entanto escolhida abaixo de 1250 °C, para evitar a corrosão a alta temperatura dos tubos do sobreaquecedor.



Emissividade da Chama

Sendo a radiação o processo de transferência de calor dominante nos geradores de vapor a combustível sólido líquido ou gasoso, a emissividade da chama é um parâmetro muito importante. Os cálculos da emissividade devem ser separados entre a chama de combustíveis gasosos e líquidos e a chama de carvão. Na chama de combustíveis gasosos ou líquidos, os principais contribuintes para a radiação são os gases triatômicos (CO_2 , H_2O , SO_2) e as partículas de fuligem. No caso de combustíveis sólidos a chama das cinzas e partículas de carvão são os principais contribuintes.

Existem quatro fontes de chamas de radiação:

- Gases triatômicos;
- Partículas de fuligem;
- Partículas de coque (carvão);
- Partículas de cinza.



Gases triatômicos

A radiação térmica de uma chama ocorre principalmente devido a três gases triatômicos, CO_2 , H_2O e SO_2 . A radiação de gases monoatômicos e biatômicos como o N_2 , O_2 , H_2 , etc, é relativamente fraca, a temperaturas a cerca de 2000°K . Por isso, pode ser desprezada no cálculo da radiação gasosa na fornalha. A radiação dos gases triatômicos é selectiva e diminui principalmente na região de comprimentos de onda infravermelho. A sua intensidade é determinada pela temperatura e pressão parcial de cada constituinte do meio de radiação e da espessura do volume de gás radiante. No entanto, sob a mesma temperatura, a intensidade radiante de substâncias gasosas é inferior à dos sólidos, como fuligem ou cinza.



Partículas de fuligem

Os hidrocarbonetos no combustível são decompostos a temperaturas elevadas, durante as reacções de combustão, formando partículas de fuligem. Essas partículas têm forte capacidade de radiação e podem tornar a chama muito brilhante. Para caldeiras a carvão a radiação de partículas de fuligem pode ser desprezada, porque a quantidade de hidrocarboneto do carvão é relativamente baixa. Mas, em caldeiras alimentadas com óleo pesado, a radiação de partículas de fuligem é significativa e, por isso, deve ser tomada em consideração.



Partículas de coque (carvão)

O coque encontra-se presente nas chamas de carvão. Estas partículas sólidas emitem forte radiação. A intensidade da radiação de partículas sólidas na chama, depende do tamanho das mesmas, da sua concentração no volume da fornalha e das suas propriedades. As partículas de coque são geralmente de 10-250 μm . A sua intensidade de radiação é próxima da de um corpo negro. Mas a sua concentração não é elevada ($< 0,1 \text{ kg/m}^3$), e são principalmente concentradas perto dos queimadores. Por conseguinte, a sua radiação é responsável por apenas 25-30% do total de radiação na fornalha.



Partículas de cinza

As partículas de cinzas são formadas após as partículas de coque arderem. Elas têm na sua maioria entre 30-50 μm . As partículas de cinzas também irradiam calor. Numa caldeira de queima de carvão, a intensidade da radiação de partículas de cinzas constitui 40-60% do total da radiação. A intensidade da radiação de partículas de cinza é inferior a temperaturas elevadas e aumenta à medida que o gás arrefece.



Tamanho efectivo do feixe de radiação

A chama é, essencialmente, um jacto de gás de combustão a alta temperatura. Algumas partículas sólidas encontram-se suspensas neste gás. Este gás é semitransparente, mas emite radiação por todas as partes, que é transmitida através do resto do gás. A radiação da chama difere da radiação de uma superfície sólida ou de um líquido. A camada mais espessa do gás é a de radiação mais intensa. Numa fornalha de caldeira a transferência de calor envolve a troca de calor entre a chama e as paredes de água. Se a superfície de aquecimento for a superfície envolvente da fornalha, a permuta de calor total é igual à radiação da chama para a superfície envolvente.



Tamanho efectivo do feixe de radiação

A radiação que chega à superfície envolvente nas diferentes direcções, percorre distâncias diferentes. Isto resulta em diferentes magnitudes de radiação. Como resultado, o cálculo da permuta total de radiação se torna ainda mais complexo.

Quando a radiação passa através de um meio de absorção de gás de espessura S , uma parte é absorvida pelo meio. A intensidade da radiação transmitida depois da absorção é dada pela lei de Beer (Holman, 1991),

$$I_s = I_o e^{-kS} \quad (10.6)$$

onde I_o e, I_s são intensidades de radiação antes da absorção gasosa e depois de atravessar-se os gases absorventes, respectivamente, e e^{-kS} é transmissividade do gás absorvente de espessura S .



Tamanho efectivo do feixe de radiação

Para o gás não reflector, a transmissividade + absorptividade = 1,0. Assim, por exemplo, da Equação 10.6, a absorptividade é $(1 - e^{-kS})$. Se considerar-se que a radiação do corpo negro E_o passa através de uma camada de gás de espessura S , a quantidade de radiação absorvida pelo meio será:

$$\epsilon_s = (1 - e^{-kS}) \epsilon_o \quad (10.7)$$

onde ϵ_o é a energia de radiação do corpo negro à temperatura igual à da chama, e $(1 - e^{-kS})$ é absorptividade do volume de gás.



Tamanho efectivo do feixe de radiação

A energia radiante transmitida através de um gás percorre diversas distâncias.

A distância mais curta entre duas superfícies tem de ser uma normal a uma delas. A radiação, percorrendo uma distância que não seja normal a uma das superfícies, iria percorrer uma distância muito maior, e portanto maior quantidade dela seria absorvida.

Para simplificar o cálculo de absorção utiliza-se uma espessura média da camada de gás radiante (camada de radiação efectiva) de espessura, S , chamado de comprimento efectivo do feixe. Que é equivalente ao raio do hemisfério que recebe a radiação a partir do seu centro.

Geralmente, o cálculo de S é muito complexo. Para geometrias padrão pode-se usar a Tabela 10.6.



Tamanho efectivo do feixe de radiação

Na ausência de informação sobre a geometria específica pode-se usar a aproximação seguinte para calcular o comprimento do feixe médio ou a espessura da camada de radiação efectiva, S (Holman, 1991)

$$S = 3,6 \frac{V_F}{F_F} \quad (10.8)$$

Onde V_F é o volume total do gás e F_F a área superficial total



Tamanho efectivo do feixe de radiação

Tabela 10.6 Espessura da camada de radiação efectiva para geometrias standart

Tipo de Volume de Gás	Comprimento médio do feixe , S
Volume entre dois planos finitos	1,8 x distância entre as placas
Cilindro (comprimento infinito) radiação para a parede	0,95 x diâmetro
Cilindro (diâmetro=altura) radiação para o centro da base	0,71x diâmetro
Cilindro (diâmetro=altura) radiação para toda a superfície	0,60 x diâmetro
Cubo, radiação para qualquer face	0,60 x aresta
Volume envolvendo feixes de tubos infinitos. radiação para um tubo	
Arranjo em triângulo equilátero passo = 2 x diâmetro	3,0 x (passo-diâmetro)
Arranjo em triângulo equilátero passo = 2 x diâmetro	3,5 x (passo-diâmetro)
Arranjo quadrangular	3,8 x (passo-diâmetro)



Emissividade de Combustível Sólido

A presença de partículas sólidas na chama de uma fornalha a combustível sólido apresenta uma complexidade adicional devido à dispersão causada pela presença das mesmas. Para todos os combustíveis sólidos a emissividade da chama é calculada pela equação:

$$\varepsilon_{ch} = 1 - e^{-kPS} \quad (10.9)$$

Onde k é o coeficiente de absorção de radiação na fornalha ($1/mMPa$), P é a pressão dos gases na fornalha (MPa), e S é a espessura efectiva da camada radiante (m) ou comprimento médio do feixe.

A chama de radiação é absorvida pelos gases tri-atômicas ($k_y r$), partículas de cinzas ($k_{cinz} \mu_{cinz}$) e partículas carvão ($10c_1 c_2$).



Emissividade de Combustível Sólido

Então, o coeficiente de absorção radiante combinada, k , é calculado adicionando os seguintes termos:

$$k = k_y r + k_{cin} \mu_{cin} + 10c_1 c_2 \left[1 / (m \cdot MPa) \right] \quad (10.10)$$

onde μ_{cinz} é a concentração de partículas de cinzas na fornalha, kg/kg. c_1 e c_2 são determinados pelo tipo de combustível e do método de queima, respectivamente.

Para antracite, $c_1=1$. Para carvão betuminoso, lenhite, turfa, óleo de xisto, e madeira $c_1=0,5$. Para uma caldeira a carvão pulverizado ou combustível líquido, $c_2=0,1$. Para uma caldeira de de queima em camadas $c_2=0,3$.



Emissividade de Combustível Sólido

O coeficiente de absorção de radiação, devido aos gases triatómicos (k_y) é calculado pelas equações:

- Para chamas luminosas

$$k_y = 1,6 \times 10^{-3} T_{sai}^f - 0,5 \quad [1/(m \cdot MPa)] \quad (10.11)$$

- Para chamas não luminosas:

$$k_y = \left(\frac{7,8 + 16r_{H_2O}}{3,16\sqrt{rPS}} - 1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T_{sai}^f}{1000} \right) \quad [1/(m \cdot MPa)] \quad (10.12)$$

Onde:

T_{sai} – é a temperatura absoluta dos gases de combustão na saída da fornalha;

S – é a espessura efectiva da camada radiante;

P – é a pressão na fornalha;

r – é a fracção dos gases triatómicos $r = r_{RO_2} + r_{H_2O}$.



Emissividade de Combustível Sólido

O coeficiente de absorção radiante devido às partículas de cinza (k_{cinz}) é calculado pela expressão:

$$k_{cin} = \frac{55900}{\sqrt[3]{(T_{sai}^f \cdot d_{cin})^2}} \left[\frac{1}{mMPa} \right] \quad (10.13)$$

Onde d_{cin} é o diâmetro das partículas de cinza em μm .

Tabela 10.7 Diâmetro médio das partículas de cinza para vários combustíveis

Combustível	Diâmetro das partículas de cinza (μm)
Carvão pulverizado	13
Outros combustíveis sólidos pulverizados (excepto turfa)	16
Turfa pulverizada	24
Combustíveis queimados em camada	20
Bagaço de cana	30



Emissividade de Combustível Sólido

A concentração adimensional das cinzas nos produtos de combustão determina-se como:

$$\mu_{cin} = \frac{a_{arr} A^t}{100 G_g} \quad (10.14)$$

Onde:

a_{arr} é a fracção de cinzas arrastadas pelos gases.

G_g é a razão entre a massa dos produtos de combustão (kg de gás) e a massa de combustível (kg de combustível) que calcula-se pela expressão:

$$G_g = 1 - \frac{A^t}{100} + 1,0161 \cdot \rho_{ar} \cdot \alpha \cdot V_{ar}^o \quad (10.15)$$

Sendo:

ρ_{ar} - a massa específica do ar em kg/m³

α - o coeficiente de excesso de ar

V_{ar}^o - o volume teórico do ar



Emissividade de Combustível Sólido

Tabela 10.8 Fracção de cinzas arrastadas pelos gases em função do tipo de combustível

Combustível	Fracção de cinzas arrastadas (a_{arr})
Bagaço de cana	0,6
Lenhite	0,7-0,8
Carvão de Pedra	0,8
Carvão magro	0,8
Antracite	0,85



Emissividade de Combustível Líquidos e Gasosos

As chamas podem ser luminosas ou não luminosas. A chama dos gases triatômicos é não luminosa. A sua absorção e radiação estão na região de comprimento de onda infravermelho. Portanto, a chama dos gases triatômicos é transparente. As partículas de fuligem tornam a chama luminosa. Próximo da zona do queimador de uma caldeira de queima de óleo pesado, a chama é luminosa devido à presença de partículas de fuligem.

A saída da fornalha a chama é muitas vezes não luminosa. A luminosidade de uma chama de gás combustível é muito mais baixa que a de combustíveis líquidos, devido à ausência de partículas de fuligem. Assim, todo o corpo da chama não é luminosa. A parte ou fração (m) da chama que é luminosa dá radiação luminosa e a outra parte dá radiação não luminosa dos gases tri-atômicos. Assim, a emissividade total, ϵ_{ch} da chama de um combustível líquido e gasoso é a soma da contribuição de ambas as partes luminosa e não luminosa da chama.



Emissividade de Combustível Líquidos e Gasosos

$$\varepsilon_{ch} = ma_l + (1 - m)a_{nl} \quad (10.16)$$

a_l - é a emissividade da parte luminosa da chama

a_{nl} - é a emissividade da parte não luminosa da chama

m - representa o grau de luminosidade da chama, depende da tensão térmica volumétrica na fornalha e do tipo de combustível.

Tabela 10.9 Coeficiente da fracção da luminosidade da chama

Tipo da chama	m
Combustível gasoso sob $q_v \leq 400 \text{ kW/m}^3$	0,1
Combustível gasoso sob $q_v > 1000 \text{ kW/m}^3$	0,6
Combustível líquido sob $q_v \leq 400 \text{ kW/m}^3$	0,55
Combustível líquido sob $q_v > 1000 \text{ kW/m}^3$	1,0



Emissividade de Combustível Líquidos e Gasosos

A emissividade da parte não luminosa da chama calcula-se de:

$$a_{nl} = 1 - e^{-k_y r P S} \quad (10.17)$$

A emissividade da parte luminosa da chama calcula-se de:

$$a_l = 1 - e^{-(k_y r + k_c) P S} \quad (10.18)$$

Onde k_y , onde é o coeficiente de absorção de radiação, devido aos gases tri-atômicos, $1/\text{mMPa}$, r é a concentração volumétrica dos gases tri-atômicos, P é a pressão na fornalha Mpa, e S é o comprimento do feixe médio (m).



Emissividade de Combustível Líquidos e Gasosos

k_c - o coeficiente de absorção de radiação pelas partículas negras da combustão e é dado por:

$$k_c = 0,032(2 - \alpha_T) \left(1,6 \frac{T_{sai}^f}{1000} - 0,5 \right) \frac{C^t}{H^t} \quad (10.19)$$

Onde:

α_T - excesso de ar na saída da fornalha;

T_{sai} - temperatura do gás de saída fornalha;

C^t - fracção de carbono no combustível em massa de trabalho;

H^t - fracção de hidrogênio no combustível em massa de trabalho.

Na queima de combustível gasoso a razão entre o teor de Carbono e o de Hidrogénio calcula-se pela expressão:

$$\frac{C^t}{H^t} = 0,12 \sum \frac{m}{n} C_m H_n \quad (10.20)$$

