

CÁLCULO TÉRMICO E FLUIDOMECÂNICO DE GERADORES DE VAPOR

Prof. Waldir A. Bizzo

Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

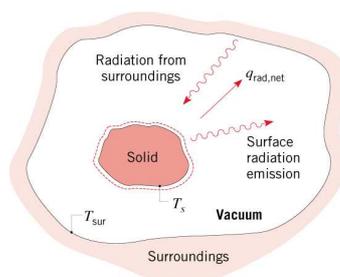
Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



General Considerations

Considerações gerais sobre radiação térmica

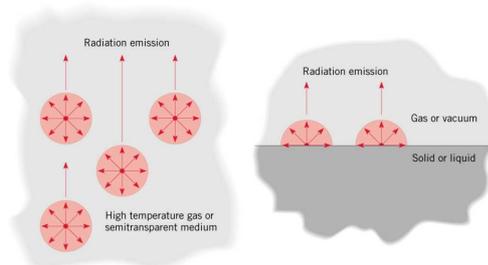
- Radiação térmica é emitida por qualquer matéria à temperatura absoluta $T > 0$
- Emissão é devida à oscilações e transições dos elétrons que formam a matéria, e que também são responsáveis pela energia térmica da mesma.
- Emissão corresponde à calor transferido da matéria, e portanto à uma redução da energia térmica armazenada na mesma
- Radiação pode ser também interceptada e absorvida pela matéria
- **Absorção de radiação resulta em calor recebido pela matéria**



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

General Considerations (cont)

- A emissão de radiação de um gás ou um sólido (ou líquido) semi-transparente é um fenômeno volumétrico.
- Emissão de um sólido ou líquido opaco é um fenômeno de superfície.



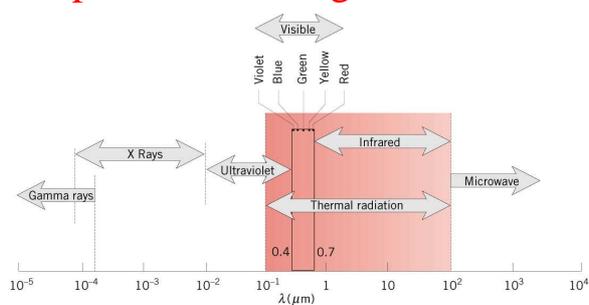
Para um líquido ou sólido opaco^(a), a emissão de radiação^(b) térmica tem origem de átomos ou moléculas dentro de 1 micrão da superfície.

- Em alguns casos o fenômeno de radiação térmica pode ser explicado por considerar a radiação como partícula (**fótons**).
- Em outros casos a radiação comporta-se como onda eletromagnética



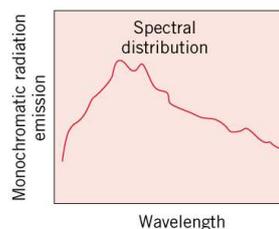
Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Espectro eletromagnético



- Radiação térmica é compreendida pelo infravermelho, visível e ultravioleta
($0.1 < \lambda < 100\mu\text{m}$)

A intensidade de radiação emitida por uma superfície varia em relação ao comprimento de onda, produzindo uma distribuição espectral. Um componente monocromático de radiação é associado a um determinado comprimento de onda ou uma faixa restrita de comprimentos de onda.

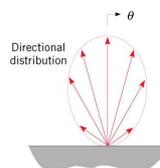


Salvador
4 a 8 de julho de 2011

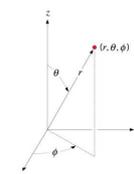
Directional Considerations

Intensidade de radiação e distribuição direcional

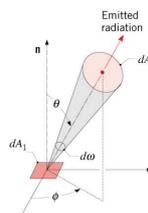
- Radiação é emitida em todas as direções e é associada a um hemisfério hipotético relacionado à superfície em questão, e é caracterizada por uma distribuição direcional.



- A direção da emissão pode ser representada por um sistema de coordenadas polares: o ângulo polar ou zênite θ , e o ângulo de azimute ϕ .



- A intensidade de radiação emitida por uma superfície dA_1 e sendo propagada em uma determinada direção (θ, ϕ) é quantificada em termos do ângulo sólido diferencial associado à direção.



$$d\omega \equiv \frac{dA_n}{r^2}$$

$dA_n \rightarrow$ Elemento de superfície de uma esfera hipotética e normal à direção (θ, ϕ)



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

The Blackbody

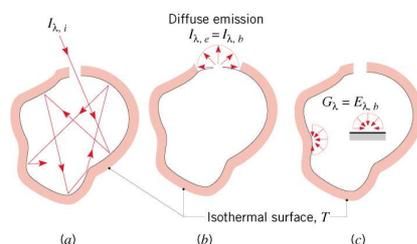
Radiação do corpo negro

- O corpo negro
 - É uma idealização que fornece limites sobre a emissão ou absorção de radiação por uma matéria:
 - Para uma determinada temperatura e comprimento de onda, nenhuma superfície pode emitir mais radiação do que um corpo negro, que é o emissor ideal

Um corpo negro é um emissor difuso

Um corpo negro absorve toda a radiação incidente: é um absorvedor ideal

- A cavidade isotérmica:



(a) Após múltiplas reflexões, toda a radiação que entra na cavidade é absorvida

(b) A emissão da abertura é a máxima possível atingida para a temperatura associada à cavidade e é difusa



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

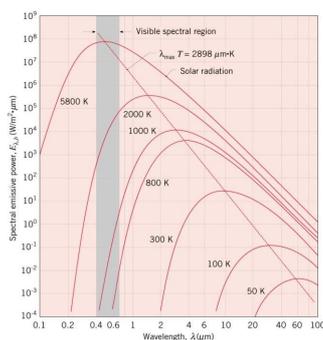
Distribuição espectral da radiação do corpo negro (distribuição de Planck)

- A distribuição espectral da potencia emissiva do corpo negro é:

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \pi I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]}$$

Primeira constante: $C_1 = 3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$

Segunda constante: $C_2 = 1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

$E_{\lambda,b}$ varia continuamente com λ e aumenta com T

A distribuição é caracterizada por um máximo no qual λ_{max} é dado pela lei de deslocamento de Wien:

$$\lambda_{max} T = C_3 = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

A fração da emissão total do corpo negro correspondente aos baixos comprimentos de onda aumenta com o aumento de T .



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Stefan-Boltzmann Law

Lei de Stefan-Boltzmann e banda de emissão

- A potencia emissiva total de um corpo negro é obtida integrando-se a distribuição de Planck sobre todos os comprimentos de onda possíveis:

$$E_b = \pi I_b = \int_0^{\infty} E_{\lambda,b} d\lambda = \sigma T^4$$

→ A lei de **Stefan-Boltzmann law**, onde

$$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \rightarrow \text{constante de Stefan-Boltzmann}$$

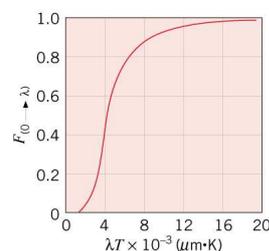
- A fração da emissão total do corpo negro que é relacionada a um intervalo de comprimento de onda ou banda ($\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$) é:

$$F_{(\lambda_1-\lambda_2)} = F_{(0-\lambda_2)} - F_{(0-\lambda_1)} = \frac{\int_0^{\lambda_2} E_{\lambda,b} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{\lambda,b} d\lambda}{\sigma T^4}$$

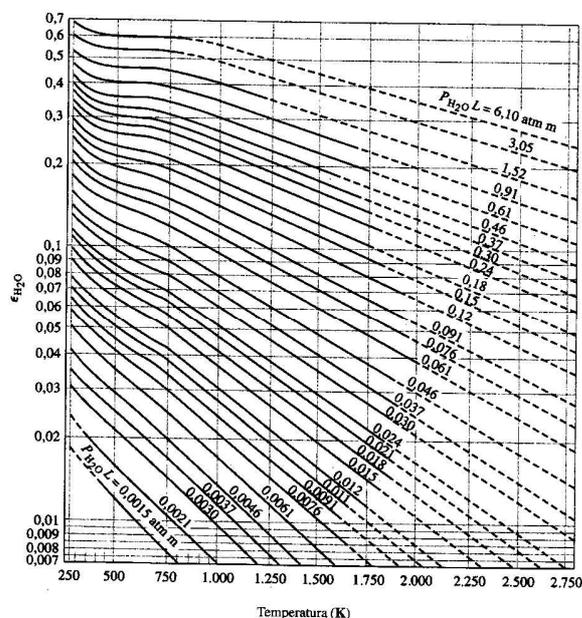
onde, em geral:

$$F_{(0-\lambda)} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda,b} d\lambda}{\sigma T} = f(\lambda T)$$

E os resultados numéricos são dados na tabela 12.1



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

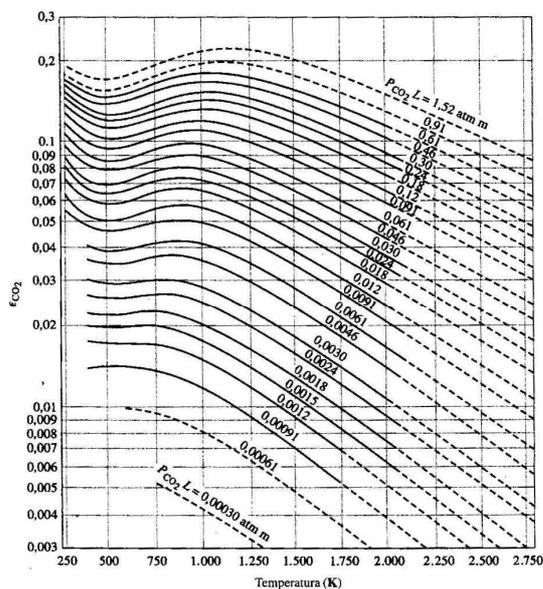


Emissividade
do vapor de
água



Salvador
4 a 8 de julho de 2011





Emissividade do dióxido de carbono

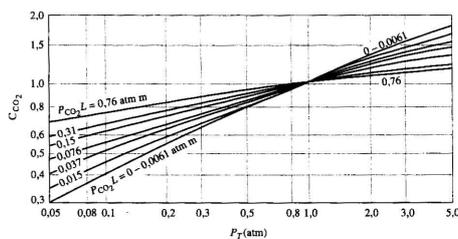


Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia

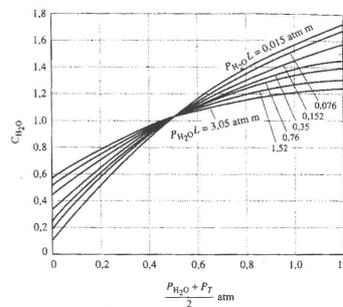


CO₂



Fator de correção para pressões diferentes de 1 atm

H₂O

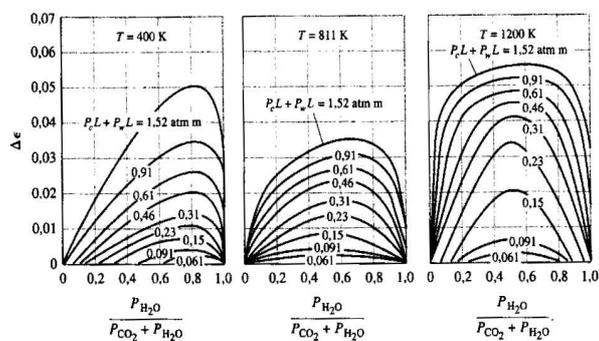


Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



$$\epsilon_g = \epsilon_{CO_2} + \epsilon_{H_2O} - \Delta\epsilon$$

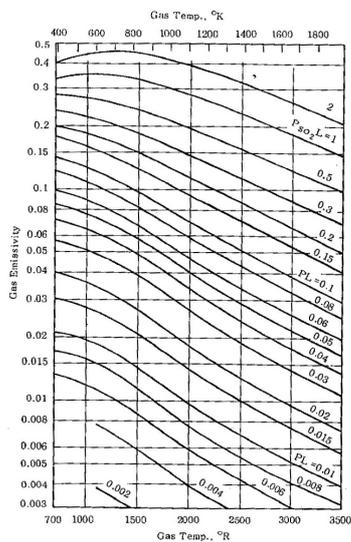


Correção para uma mistura de vapor de água e dióxido de carbono



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



emissividade SO_2

Fig. 6-15. Emissivity of sulfur dioxide (adapted from calculations by Guerrieri). L = effective path length, ft.; p = partial pressure of SO_2 , atm.



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



Comprimento médio do feixe

$$L \approx 3,4 \frac{\text{volume}}{\text{área}}$$

Geometria	L
Esfera	$\frac{2}{3}$ (diâmetro)
Cilindro infinito	Diâmetro
Planos paralelos infinitos	2 (distância entre os planos)
Cilindro semi-infinito, irradiando para o centro da base	Diâmetro
Cilindro circular reto, altura igual ao diâmetro:	
irradiando para o centro da base	Diâmetro
irradiando para toda a superfície	$\frac{2}{3}$ (diâmetro)
Cilindro infinito de seção transversal semicircular, irradiando para um ponto no meio do lado plano	Raio
Paralelepípedos retangulares:	
cubo	$\frac{2}{3}$ (borda)
1:1:4 irradiando para face 1 x 4	0,9 (borda mais curta)
irradiando para face 1 x 1	0,86 (borda mais curta)
irradiando para todas as faces	0,891 (borda mais curta)
Espaço externo de um banco infinito de tubos com os centros em triângulos equiláteros:	
diâmetro do tubo = espaçamento	3,4 (espaçamento)
diâmetro do tubo = $\frac{1}{2}$ (espaçamento)	4,44 (espaçamento)



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



Absortividade para uma mistura de gases

$$\alpha_g = \left(\frac{T_g}{T_s} \right)^n \epsilon_g \left(T_s, pL \frac{T_s}{T_g} \right)$$

$n=0,65$ para CO_2

$n=0,45$ para H_2O

$$\alpha_m = \alpha_{\text{CO}_2} + \alpha_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta\epsilon$$

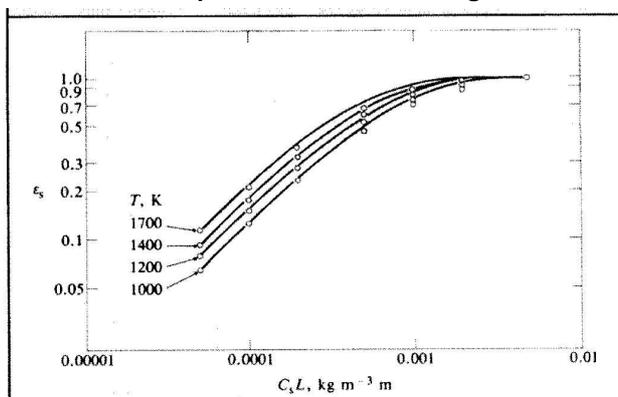


Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



Emissividade para uma nuvem de fuligem



Emissividade para uma mistura de gases e fuligem:

$$\epsilon_m = \epsilon_g + \epsilon_s - \epsilon_g \epsilon_s$$

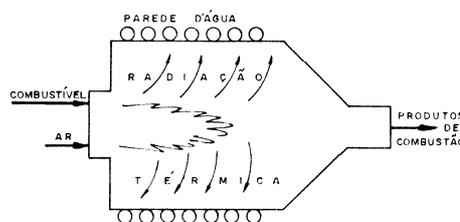


Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



Balço de massa e energia em uma fornalha

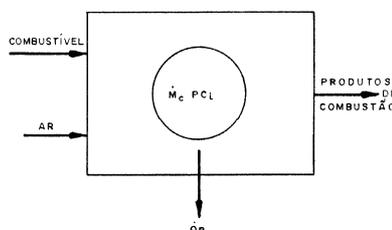


energia que entra = energia que sai

$$\dot{m}_c PCi + \dot{m}_c \Delta h_c + \dot{m}_{ar} \Delta h_{ar} = \dot{Q}_r + \dot{m}_{prod} \Delta h_{prod}$$

sendo que:

$$\Delta h = \int_0^t Cp dT = \bar{Cp}(T_t - T_0)$$



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



$$\dot{Q}_R = \frac{\sigma (T_f^4 - T_s^4) A}{\sum R_T}$$

Calor transferido por radiação na fornalha

$$\sum R_T = \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{1g} \alpha_g}$$

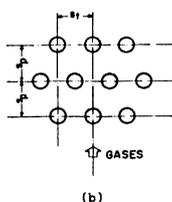
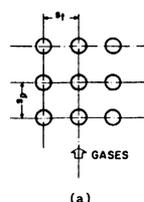
ε_1 : emissividade da superfície

α_g : emissividade dos gases+fuligem



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



$$Nu = C_1 Re^n Pr^m \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25}$$

Arranjo	Faixa de Reynolds	C_1	n	m
alinhado	0 - 100	0,9	0,4	0,36
	100 - 1000	0,52	0,5	0,36
	1000 - 2×10^5	0,27	0,4	0,36
Quicôncio	2×10^5 - 2×10^6	0,033	0,8	0,4
	0 - 500	1,04	0,4	0,36
	500 - 1000	0,71	0,5	0,36
	1000 - 2×10^5	$0,35 (S_T/S_L)^{0,2}$	0,6	0,36
	2×10^5 - 2×10^6	$0,31 (S_T/S_L)^{0,2}$	0,8	0,36



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



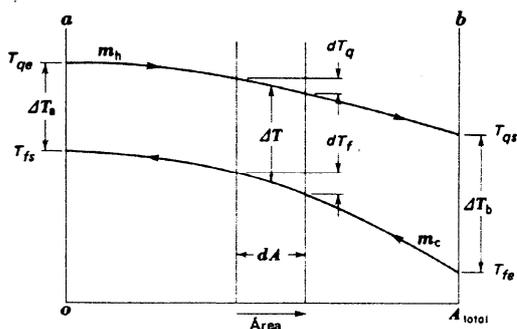
Correção para fileiras de tubos menor que 10

nº fileiras	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_b	0,7	0,82	0,87	0,91	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99

$$\dot{Q}_c = U A \Delta t_m$$

onde:

$$\Delta t_m = dmlt = \frac{\Delta t_a - \Delta t_b}{\ln \frac{\Delta t_a}{\Delta t_b}}$$



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



Coeficiente global de troca de calor

$$U = \frac{1}{Ri + Re + R_{tubo}}$$

onde:

$$Ri = \frac{de}{hi di} \quad Re = \frac{1}{he} \quad R_{tubo} = \frac{de \ln(de/di)}{2 k_i}$$

- Devem ser incluídas fator de incrustação ou (resistencia de depósito) devido à deposição de cinzas nas superfícies externas dos tubos

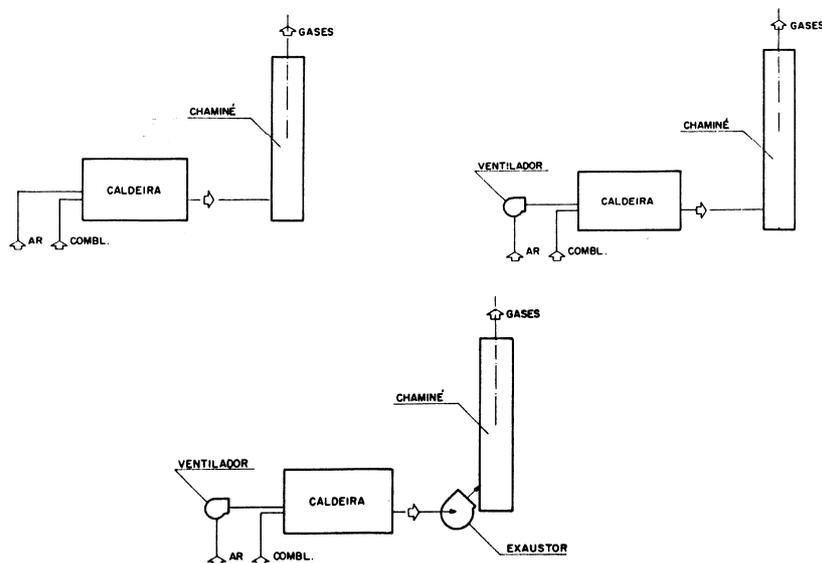


Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia

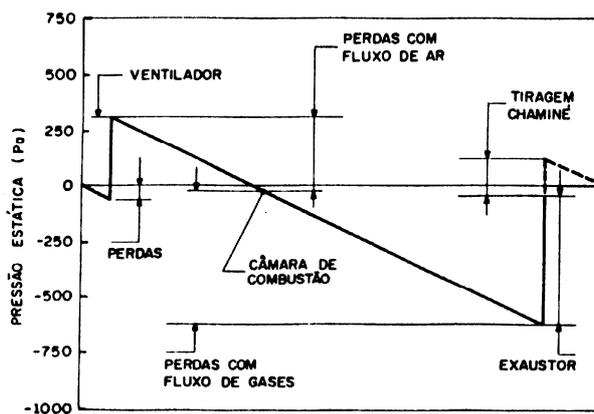


Circulação dos gases no gerador de vapor



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



Curva de pressão no interior da caldeira com tiragem balanceada



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



Perda de carga no feixe de convecção

$$\Delta p = K \rho \frac{v^2}{2}$$

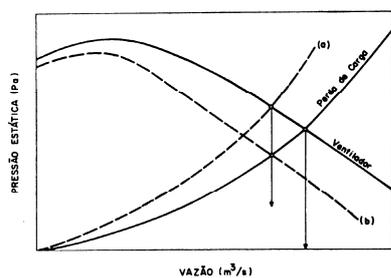
$$K = f N_f \left[\frac{\mu_p}{\mu_m} \right]^{0,14}$$

Tubos alinhados

$$f = \left[0,044 + \frac{0,08 \frac{S_p}{de}}{\left(\frac{S_i - de}{de} \right)^{0,43+1,13 \left(\frac{de}{S_p} \right)}} \right] \text{Re}_{\max}^{-0,15}$$

Tubos em quicôncio

$$f = \left[0,25 + \frac{0,118}{\left(\frac{S_i - de}{de} \right)^{1,08}} \right] \text{Re}_{\max}^{-0,16}$$

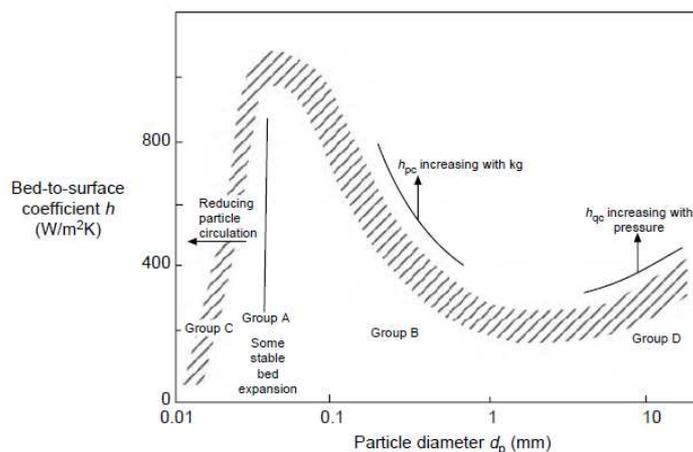


Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



Transferência de calor em caldeiras de leito fluidizado borbulhante



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



correlação empírica de Andeen e Glicksman (1976)

$$h_o = 900(1 - \varepsilon) \frac{K_g}{d_t} \left[\frac{U d_t \rho_p}{\mu} \frac{\mu^2}{d_p^2 \rho_g^2} \right]^{0.326} Pr^{0.3} + \frac{\alpha(T_b^4 - T_w^4)}{\left[\frac{1}{e_b} + \frac{1}{e_w} - 1 \right] (T_b - T_w)} \quad (6.49)$$

α = Stefan-Boltzmann constant, 5.67×10^{-11} (kW/K⁴ m²)

T_b = temperature of the bed of EHE (K)

T_w = temperature of the tube wall (K)

e_w = emissivity of the tube wall

U = superficial gas velocity through the bubbling bed (m/sec)

ε = void fraction in the bed

Also, $(U d_p \rho_p / \mu_g) < 10$, and the emissivity of the bed e_b is found from the relation (Grace, 1982):

$$e_b = 0.5(1 + e_p)$$

where e_p is the emissivity of bed particles.



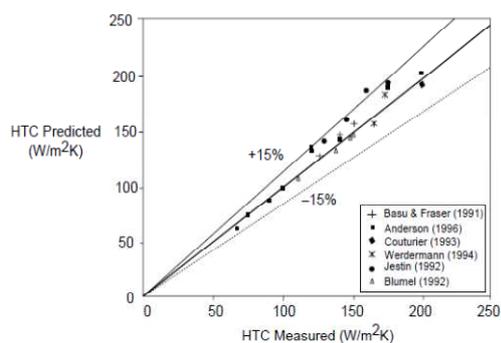
Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia



Transferencia de calor no leito fluidizado circulante

$$h = 5 \rho_{avg}^{0.391} T_b^{0.408}$$



Salvador
4 a 8 de julho de 2011

Mini- Curso Conversão de Resíduos a Energia

