

TORRES DE RESFRIAMENTO NOÇÕES BÁSICAS

AR ATMOSFÉRICO

- teor de umidade: relação de massas vapor de água / ar seco;
- umidade específica: relação de massas vapor de água / total ar úmido;
- grau de saturação: umidade do ar / umidade do ar saturado;
- umidade relativa: fração mol vapor água ar / fração mol vapor água ar saturado.

- TEMPERATURAS (conceitos):

- bulbo seco: temperatura do ar;
- bulbo úmido: equilíbrio dinâmico entre a água e o ar;
- ponto de orvalho: temperatura de saturação.

- ENTALPIA DO AR ÚMIDO:

- Soma das entalpias do ar e do vapor de água.

IMPORTANTE: O sistema ar / vapor de água não forma uma mistura ideal.

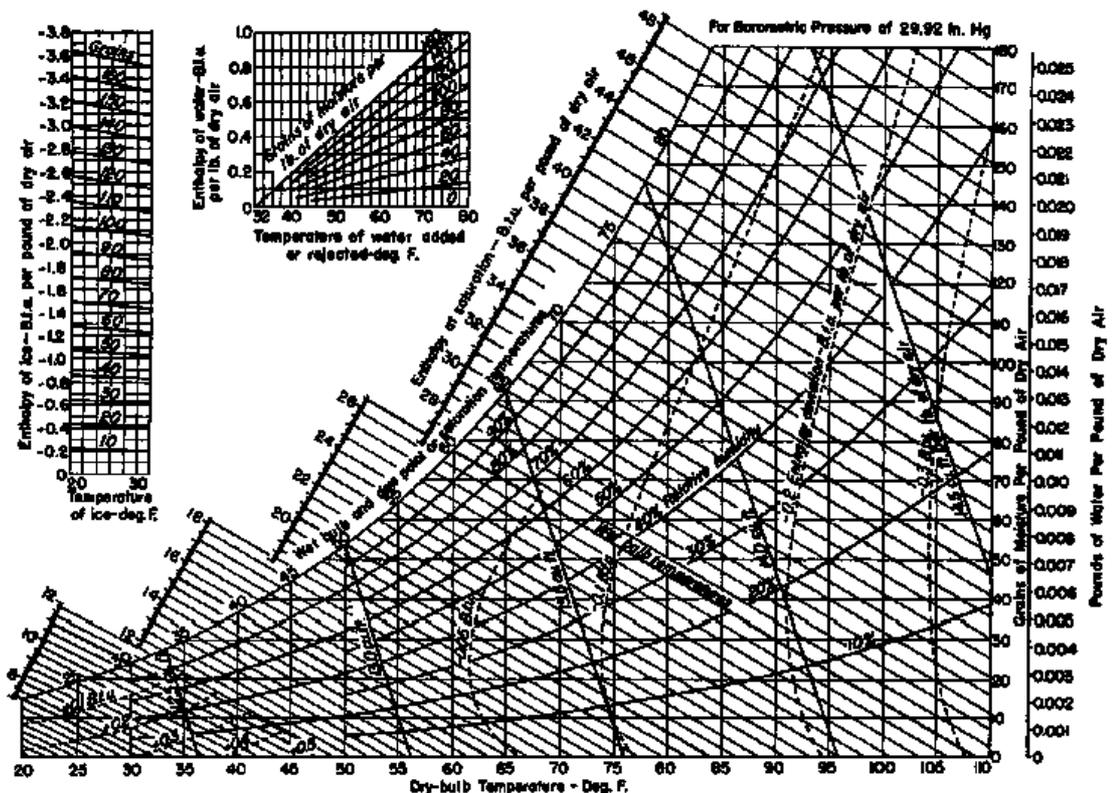
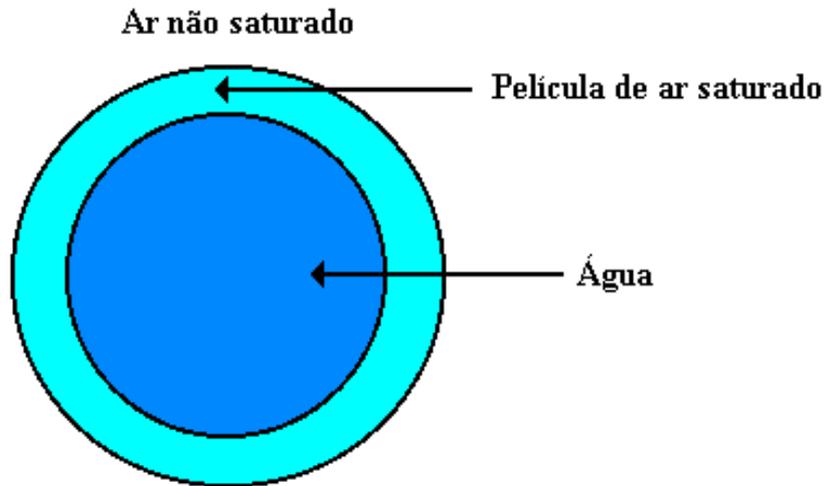


FIG. 12-2 Psychrometric chart—medium temperatures. Barometric pressure, 29.92 in.Hg. To convert British thermal units per pound dry air-degree Fahrenheit to joules per kilogram-kelvin, multiply by 4.1868; and to convert cubic feet per pound to cubic meters per kilogram, multiply by 0.0624.

TEORIA DE MERKEL



$$dQ = K \cdot dS \cdot (h_U - h_A)$$

TIPOS DE TORRES DE RESFRIAMENTO

TIRAGEM:

- tiragem natural;
- tiragem mecânica: induzida ou forçada.

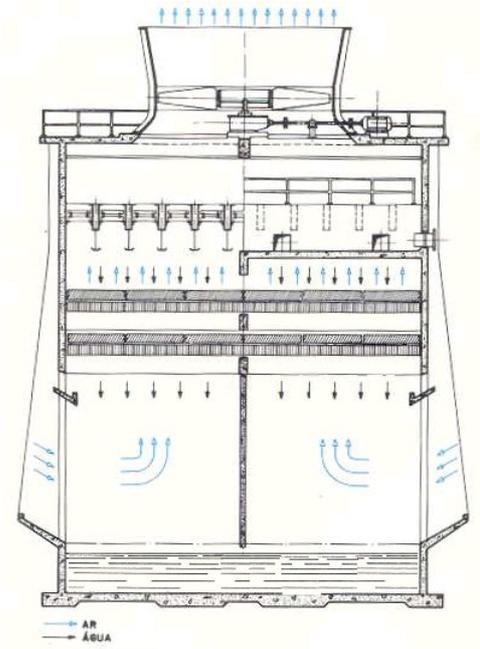
FLUXOS:

- contra corrente;
- correntes cruzadas.

TIRAGEM NATURAL



TORRE DE CONTRA CORRENTE



Crítérios:

- as temperaturas, os fluxos de água e ar e as entalpias do ar são constantes em toda a área de uma mesma seção horizontal da torre;
- o ar frio, na entrada da torre, está saturado e na temperatura de bulbo úmido.

Integração da equação de Merkel

$$\frac{K \cdot a \cdot V}{L} = \int_{t_{UF}}^{t_{UQ}} \frac{C_L \cdot dt}{h_U - h_A}$$

Balço de energia

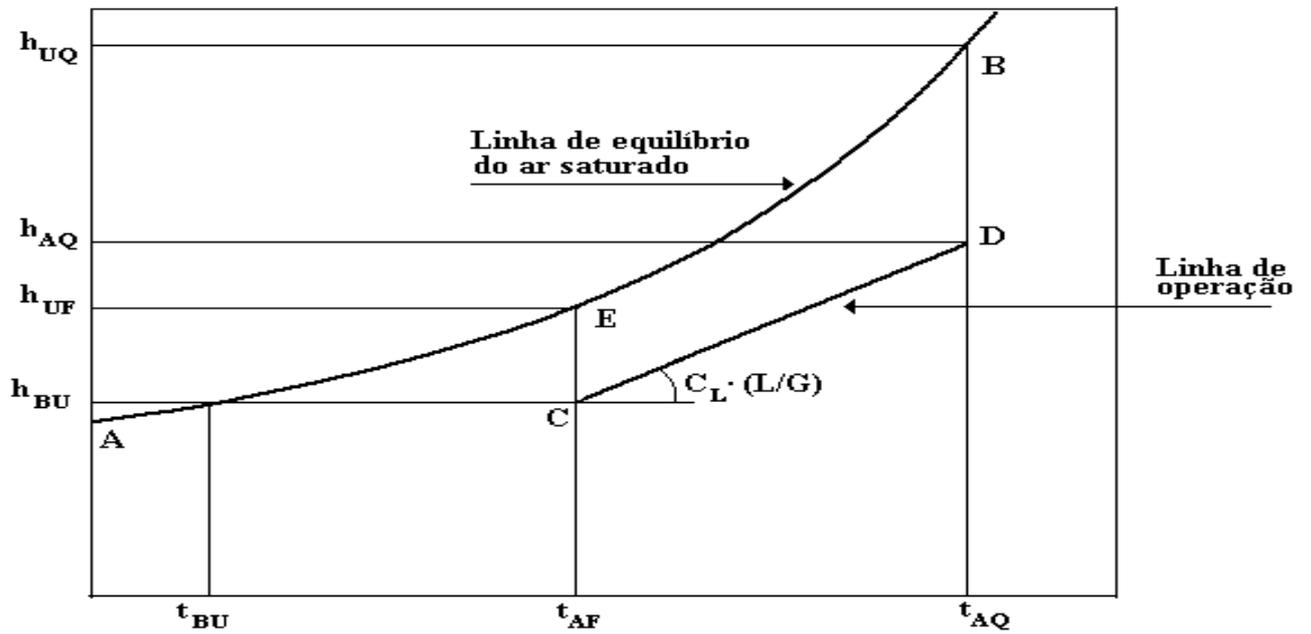
$$h_{AQ} = h_{BU} + \left(\frac{L}{G} \right) \cdot C_L \cdot (t_{UQ} - t_{UF})$$

$$dQ = K \cdot dS \cdot (h_U - h_A)$$

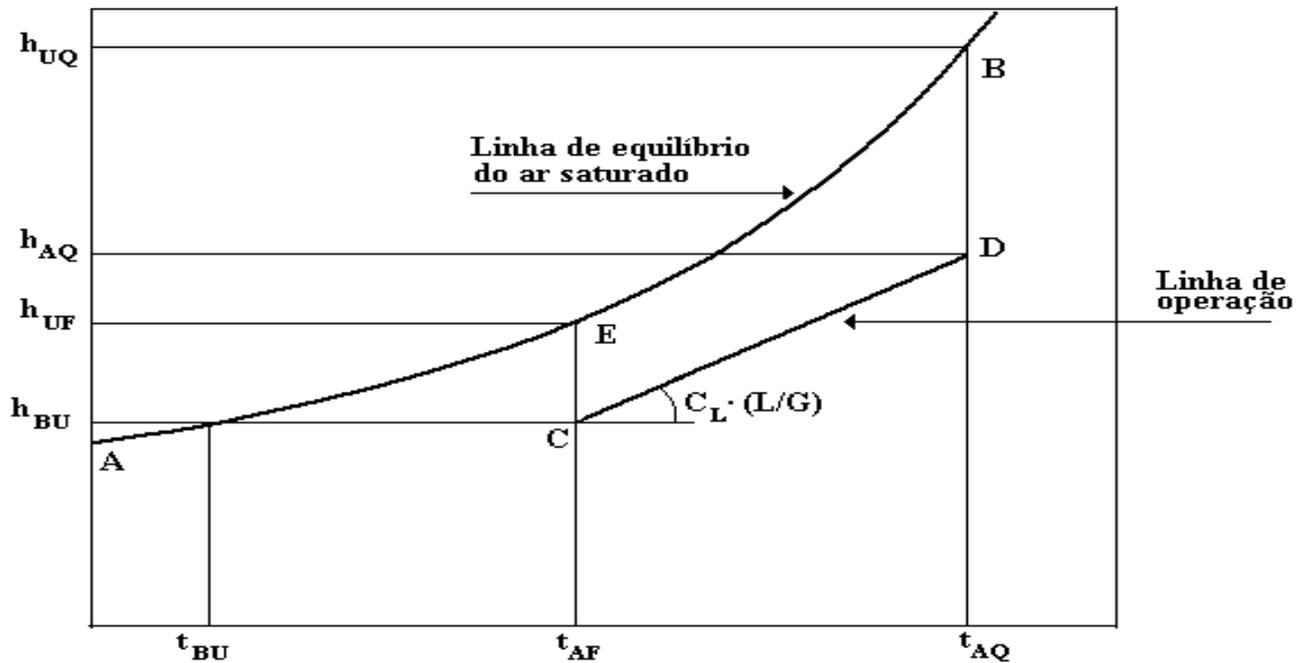
$$dQ = K \cdot dS \cdot (h_U - h_A)$$

Nas equações acima, L é considerado constante, desprezando-se a pequena parcela evaporada (1,5% a 2,0% de L).

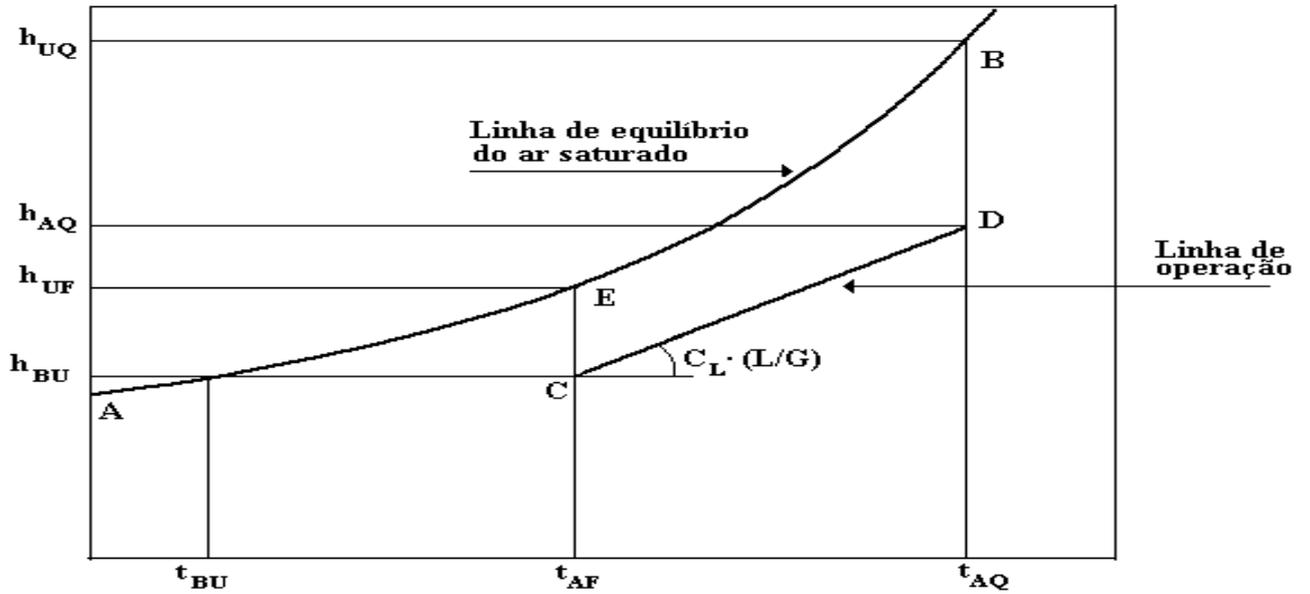
Representação gráfica da equação de Merkel



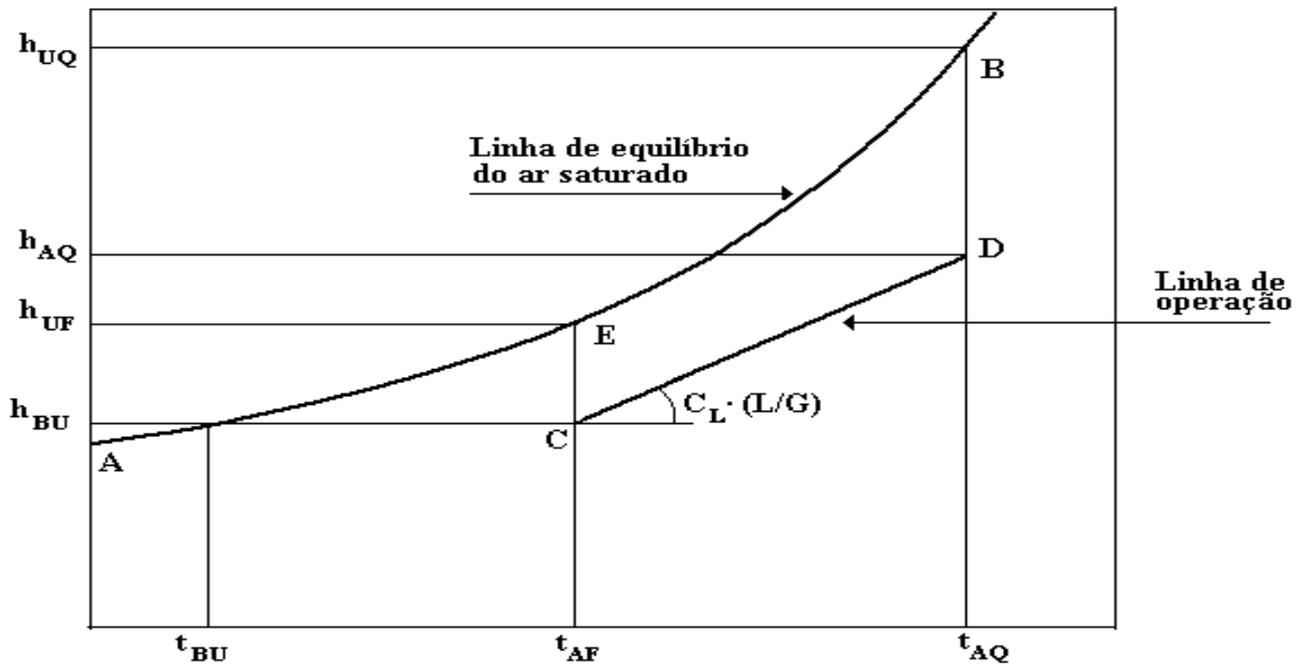
A linha A-B representa as entalpias do ar saturado, em função da temperatura.



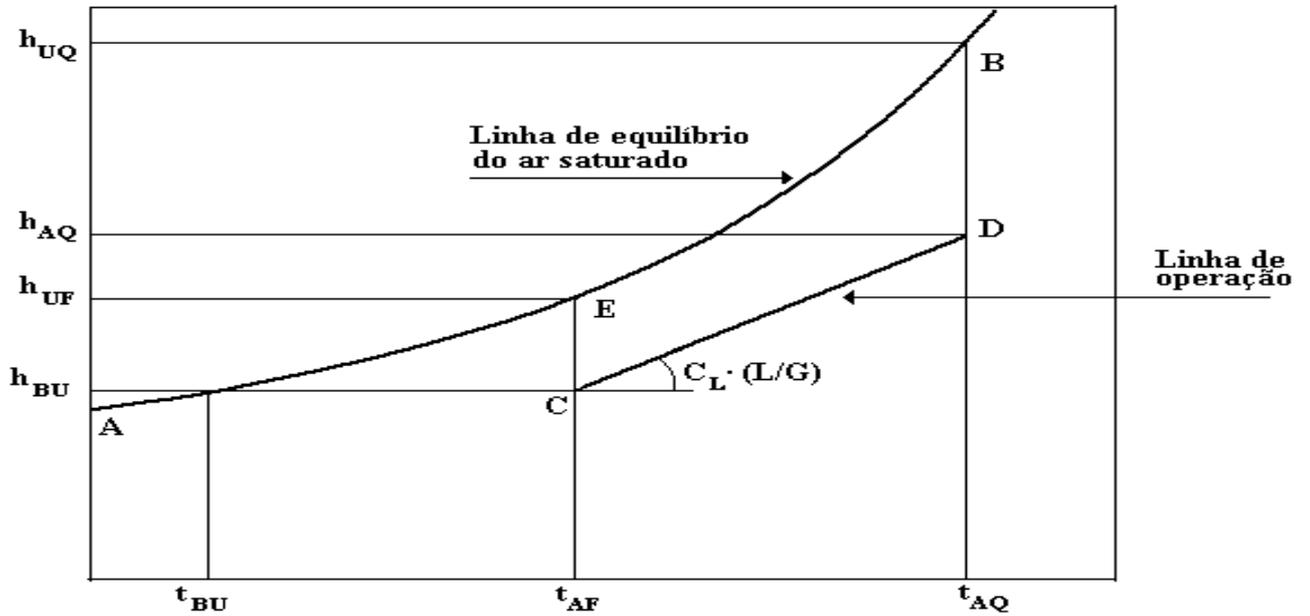
A linha C-D (reta) representa a operação da torre ou seja, as entalpias do ar no interior da torre.



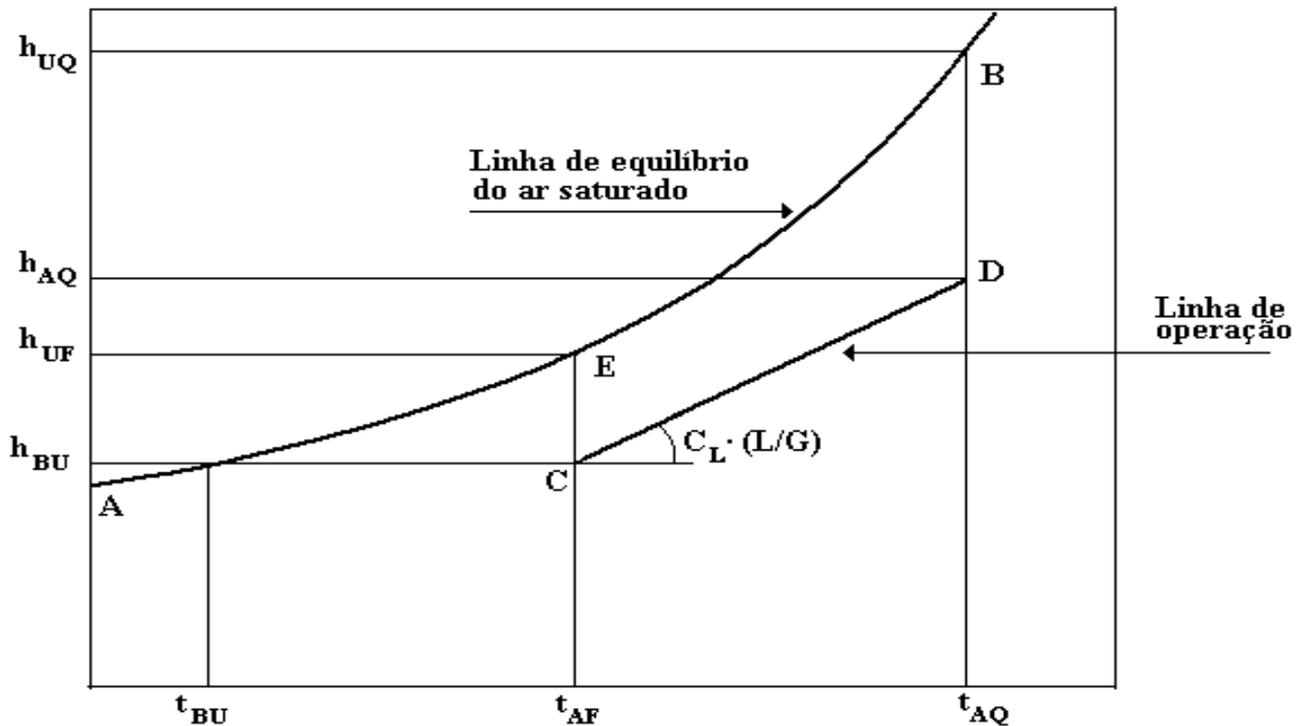
A inclinação da reta de operação depende da relação água / ar, sendo definida pela expressão $C_L \cdot (L / G)$.



A força motriz para a transferência de massa e calor é a diferença entre as entalpias na linha de equilíbrio e na reta de operação.



Para um dado valor de L / G , quanto maiores as diferenças entre as entalpias na linha de equilíbrio e na reta de operação, menor será o $K . a . V / L$ exigido.



Integração da equação de Merkel (Tchebeychef)

$$\frac{K \cdot a \cdot V}{L} = \int_{t_{UF}}^{t_{UQ}} \frac{C_L \cdot dt}{h_U - h_A}$$

$$\frac{K \cdot a \cdot V}{L} = \frac{t_{UQ} - t_{UF}}{4} \cdot C_L \cdot \left[\left(\frac{1}{h_{U1} - h_{A1}} \right) + \left(\frac{1}{h_{U2} - h_{A2}} \right) + \left(\frac{1}{h_{U3} - h_{A3}} \right) + \left(\frac{1}{h_{U4} - h_{A4}} \right) \right]$$

Entalpias

$$h_{A1} = h_{BU} + 0,1 \cdot \left(\frac{L}{G} \right) \cdot C_L \cdot (t_{UQ} - t_{UF})$$

$$h_{A2} = h_{BU} + 0,4 \cdot \left(\frac{L}{G} \right) \cdot C_L \cdot (t_{UQ} - t_{UF})$$

$$h_{A3} = h_{BU} + 0,6 \cdot \left(\frac{L}{G} \right) \cdot C_L \cdot (t_{UQ} - t_{UF})$$

$$h_{A4} = h_{BU} + 0,9 \cdot \left(\frac{L}{G} \right) \cdot C_L \cdot (t_{UQ} - t_{UF})$$

Temperaturas

$$t_{U1} = t_{UF} + 0,1 \cdot (t_{UQ} - t_{UF})$$

$$t_{U2} = t_{UF} + 0,4 \cdot (t_{UQ} - t_{UF})$$

$$t_{U3} = t_{UF} + 0,6 \cdot (t_{UQ} - t_{UF})$$

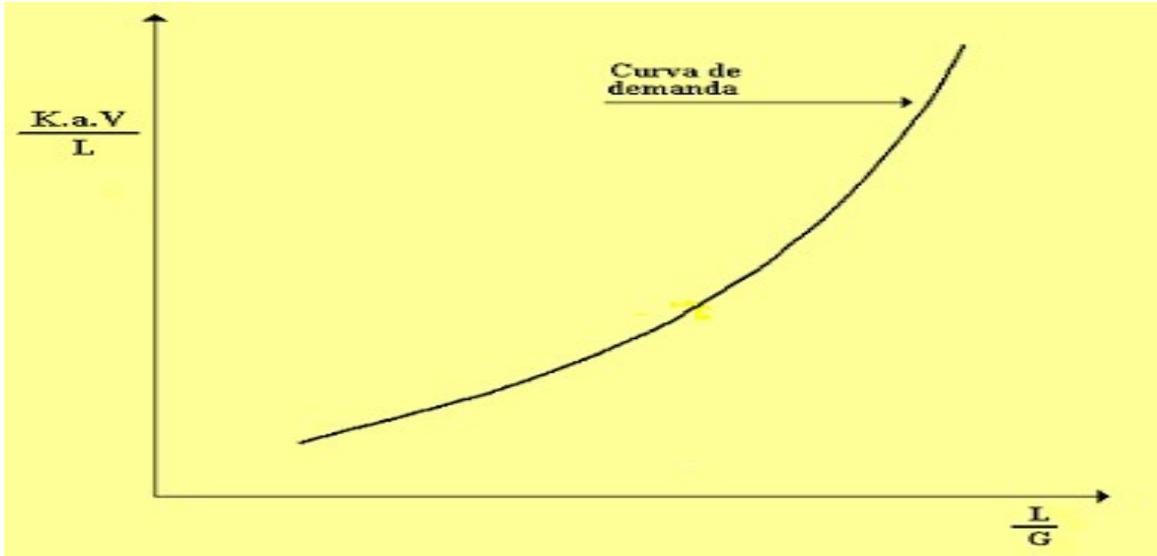
$$t_{U4} = t_{UF} + 0,9 \cdot (t_{UQ} - t_{UF})$$

A integração da equação de Merkel mostra que:

- $K \cdot a \cdot V / L$ é a capacidade de transferência de massa requerida da torre, para uma dada condição de operação, sendo função unicamente do L / G e das temperaturas t_{UQ} , t_{UF} e t_{BU} ;
- $K \cdot a \cdot V / L$ cresce com o L / G e com a diferença $t_{UQ} - t_{UF}$ (Δt), diminuindo com $t_{UF} - t_{BU}$ (aproximação);
- para os mesmos valores de L / G , t_{UQ} , t_{UF} e t_{BU} , o $K \cdot a \cdot V / L$ requerido diminui com a altitude, sendo a diferença sensível a partir de 300 m.

Curva de demanda

A integração da equação de Merkel, mantendo constantes as temperaturas t_{UQ} , t_{UF} e t_{BU} mas variando o L/G , fornece os valores correspondentes de $K \cdot a \cdot V/L$. Os valores de L/G e os respectivos $K \cdot a \cdot V/L$, podem ser lançados em um gráfico que representa a curva de demanda da torre.



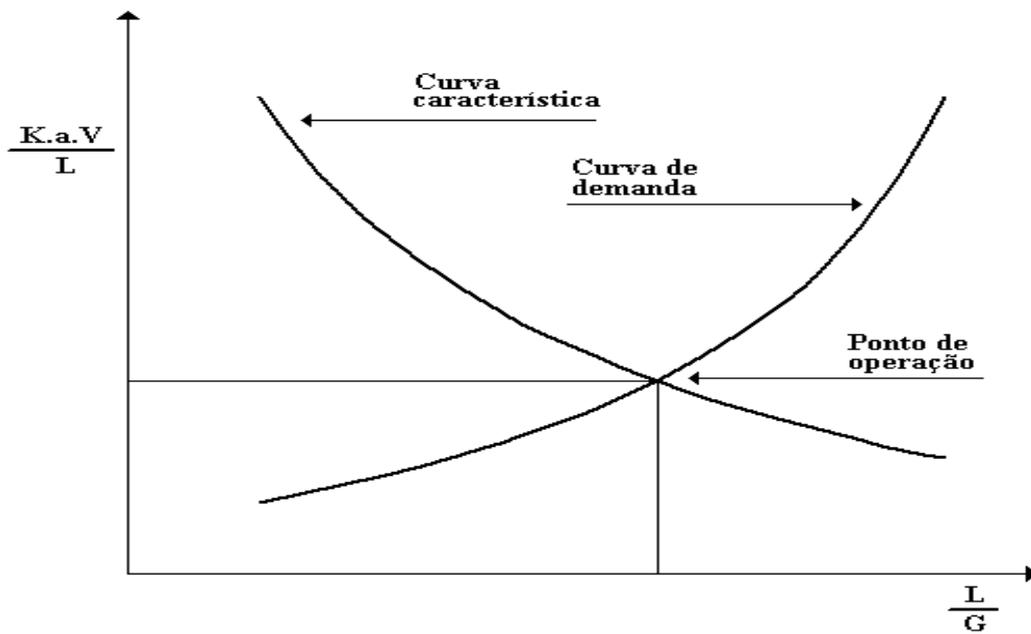
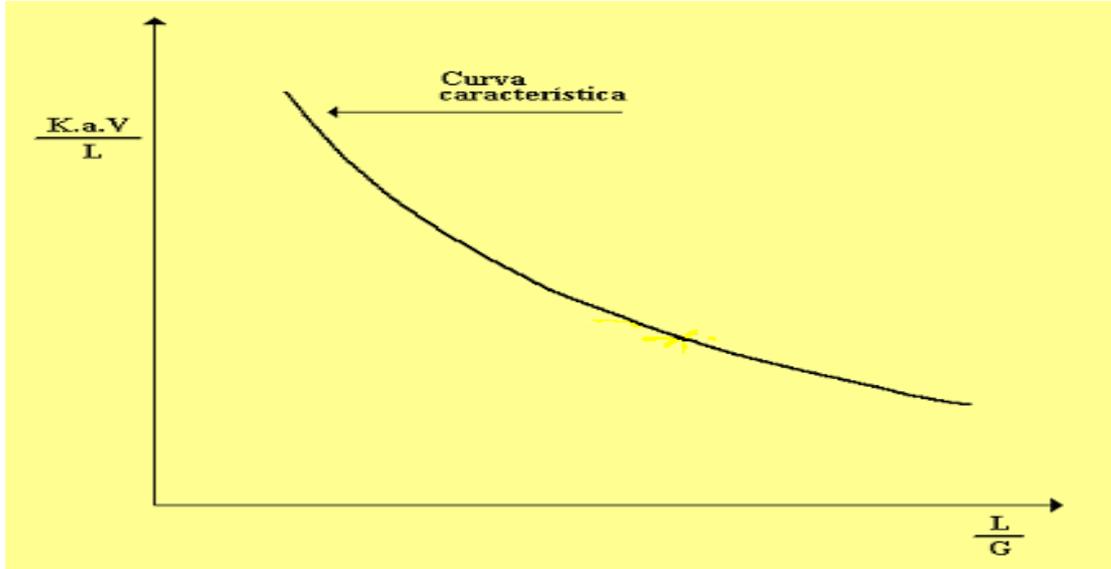
Curva característica

A capacidade de transferência da torre, em função do enchimento utilizado (tipo, volume, arranjo etc.) é obtida pela expressão:

$$\frac{K \cdot a \cdot V}{L} = C \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{-n}$$

Os valores de L/G e os respectivos $K \cdot a \cdot V/L$, podem ser lançados em um gráfico que representa a curva característica da torre.

Curva característica



Influência da altura do enchimento

$$\frac{K \cdot a \cdot V}{L} = C \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{-n}$$

$$\frac{K \cdot a \cdot V}{L} = C_{un} \cdot Y \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{-n}$$

Correções na curva característica

Efeito das extremidades:

$$K \cdot a \cdot V / L \text{ (total)} = K \cdot a \cdot V / L \text{ (enchimento)} + K \cdot a \cdot V / L \text{ (extremidades)}$$

$$K \cdot a \cdot V / L \text{ (extremidades)} \approx 0,07$$

Efeito da temperatura:

Entre 37,8 oC (100 oF) e 65,5 oC (150 oF), para cada 10 oC de acréscimo o $K \cdot a \cdot V / L$ tem uma redução 3,6% (2% para cada 10 oF).

ABAIXO EXEMPLIFICAMOS UM EXEMPLO DE CÁLCULO

CONTRA CORRENTE - EXEMPLO DE CÁLCULO

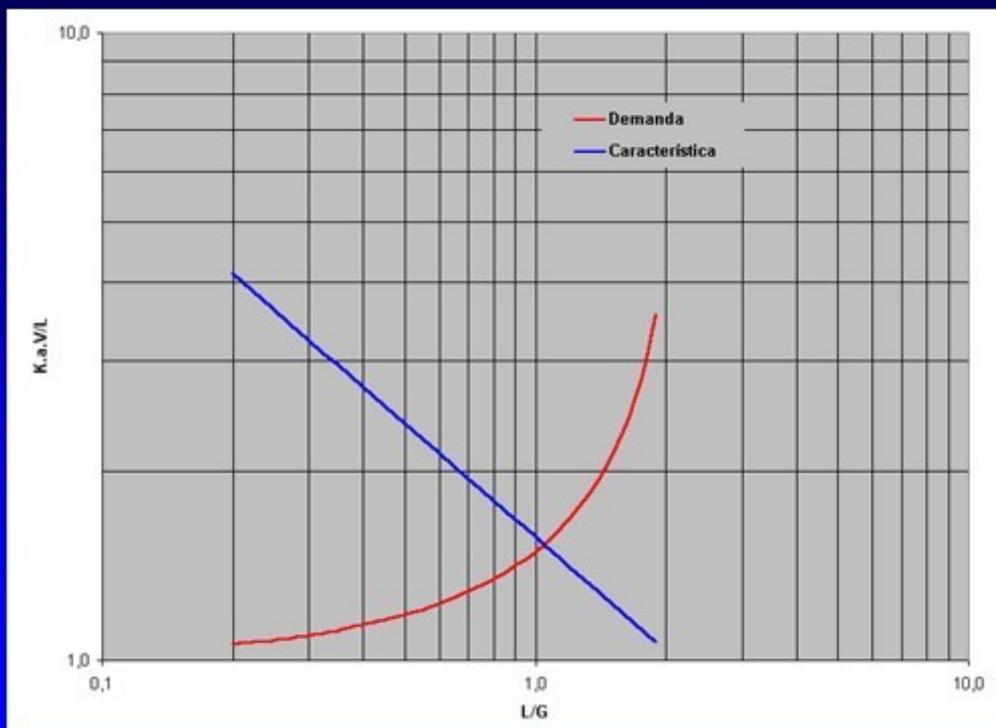
Dados de entrada:

- temperatura da água quente, t_{wQ} : 45,0 °C;
- temperatura da água fria, Tu_F : 30,0 °C;
- temperatura de bulbo úmido do ar, $t_{B U}$: 24,0 °C;
- $C = 1,600$ e $n = 0,600$;
- altitude: 0 m.

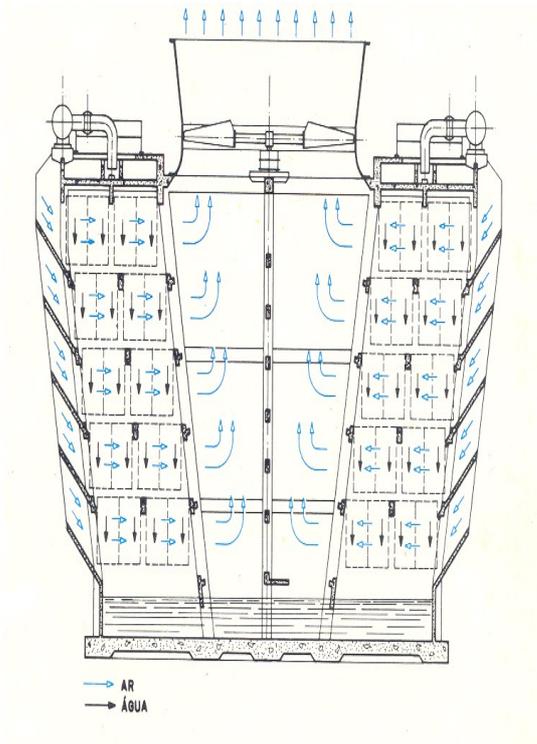
Resultados:

- $L / G = 1,0490$;
- $K.a.Y / L = 1,5311$;
- $C = 1,5740$, corrigido em função da temperatura da água quente.

CONTRA CORRENTE - CURVAS CALCULADAS



TORRE DE CORRENTES CRUZADAS

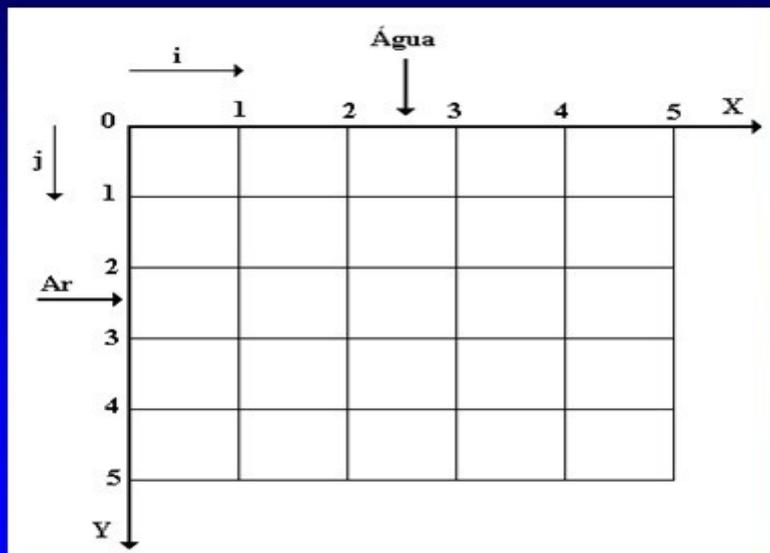


ABAIXO EXEMPLIFICAMOS UM EXEMPLO DE CÁLCULO

CRITÉRIOS: CÁLCULO CONFORME KELLY

- distribuição uniforme da água na superfície superior do enchimento;
- distribuição uniforme do ar na lateral da torre;
- fluxo horizontal do ar no enchimento;
- o ar frio, na entrada da torre, está saturado e na temperatura de bulbo úmido.

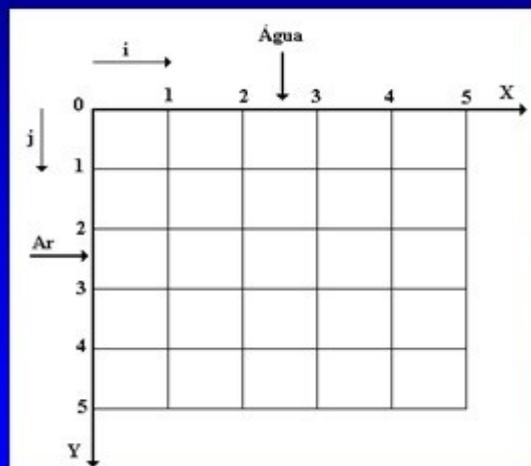
Corte transversal - Malha



Tamanho da malha

$$\Delta x = \frac{\Delta X \cdot K \cdot a}{G}$$

$$\Delta y = \frac{\Delta Y \cdot K \cdot a}{L}$$



CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS

Eixo dos X (j=0):

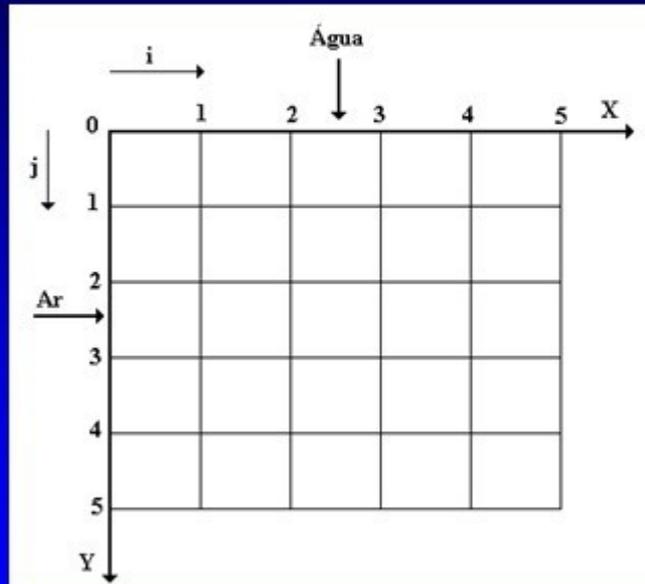
$$t_{U(i,0)} = t_{UQ}$$

$$h_{U(i,0)} = h_{UQ}$$

Eixo dos Y (i=0):

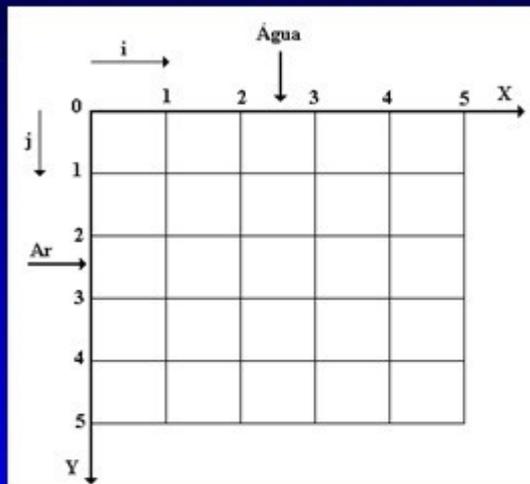
$$t_{A(0,j)} = t_{BU}$$

$$h_{A(0,j)} = h_{BU}$$



CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS

Pontos nos limites da torre:

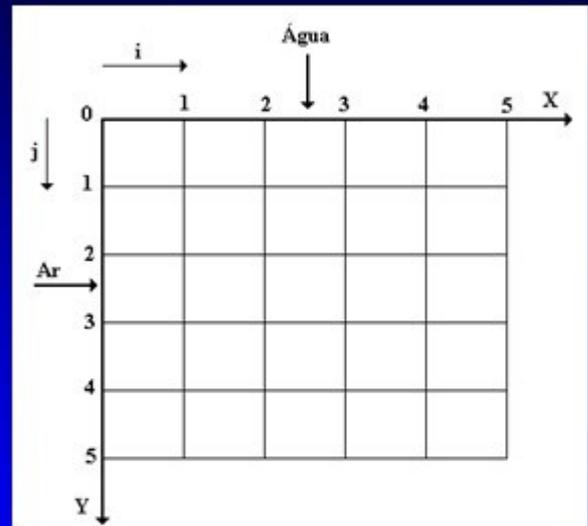


Entalpias do ar para j=0:

$$h_{A(i,0)} = \frac{h_{A(i-1,0)} + (\Delta x / 2) \cdot [2 \cdot h_{UQ} - h_{A(i-1,0)}]}{1 + (\Delta x / 2)}$$

CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS

Pontos nos limites da torre:



Temperaturas da água para $i=0$:

$$t_{U(0,j)} = t_{U(0,j-1)} - \left(\frac{\Delta x}{2 \cdot C_L}\right) \cdot \left[h_{U(0,j-1)} + h_{U(0,j)} - 2h_{BU} \right]$$

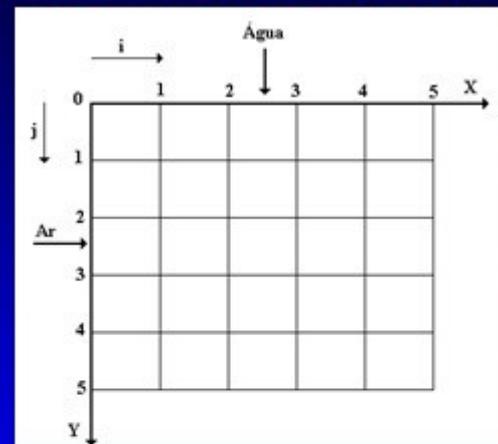
Cálculo por tentativas: $h_{u(0,j)}$ é função de $t_{u(0,j)}$

CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS

Pontos no interior da torre:

Cálculo por tentativas

Temperaturas da água:



$$t_{U(i,j)} = t_{U(i,j-1)} - \left(\frac{\Delta y}{2 \cdot C_L}\right) \cdot \left[h_{U(i,j-1)} - h_{A(i,j-1)} + h_{U(i,j)} - h_{A(i,j)} \right]$$

Entalpias do ar:

$$h_{A(i,j)} = h_{A(i-1,j)} + \left(\frac{\Delta x}{2}\right) \cdot \left[h_{U(i-1,j)} - h_{A(i-1,j)} + h_{U(i,j)} - h_{A(i,j)} \right]$$

CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS

Tamanho de malha

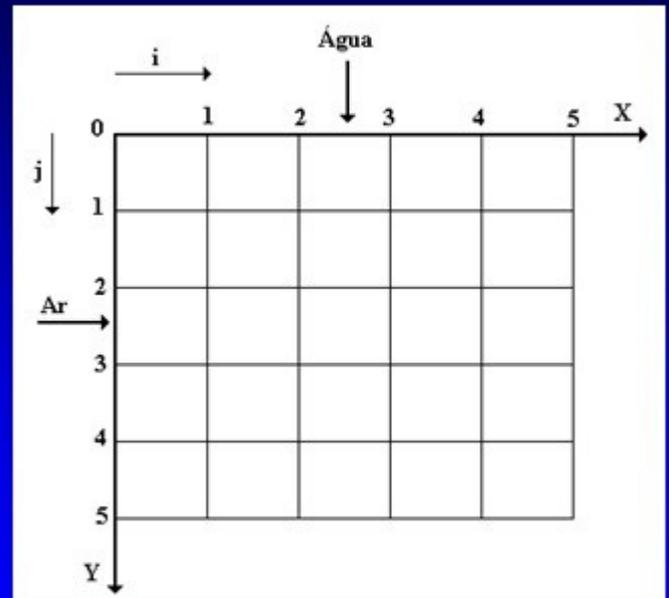
Calcular fazendo:

$$\Delta x = \Delta y = 0,1$$

$$\Delta x = \Delta y = 0,2$$

Extrapolar para a malha zero:

$$R_0 = R_2 + \frac{(R_2 - R_1)}{\left(\frac{m_1}{m_2}\right)^2 - 1}$$

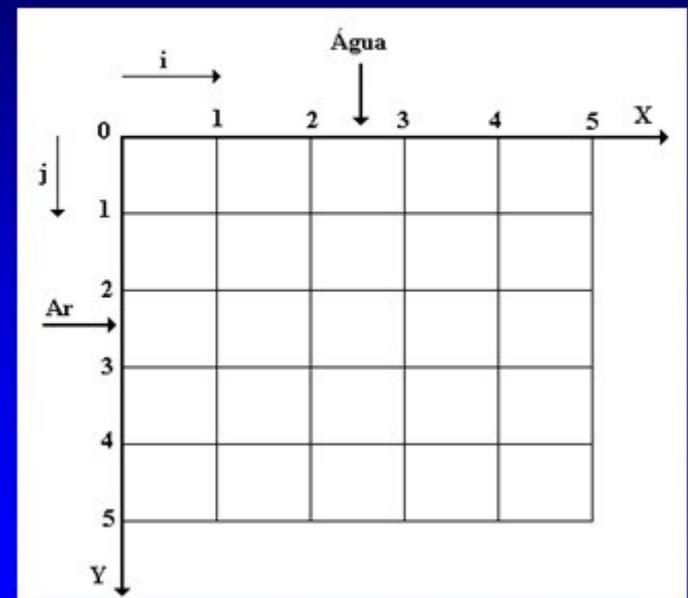


CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS

Curva de demanda: $K \cdot a \cdot Y / L$ vs L_t / G_t

$$\frac{K \cdot a \cdot X}{G} = i \cdot \Delta x$$

$$\frac{K \cdot a \cdot Y}{L} = j \cdot \Delta y$$



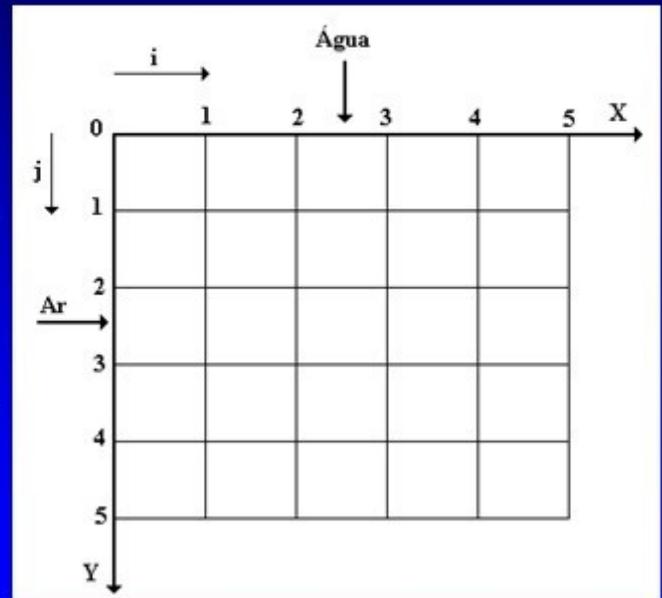
CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS

Curva de demanda: $K \cdot a \cdot Y / L$ vs L_T / G_T

$$G_T = G \cdot Y$$

$$L_T = L \cdot X$$

$$\frac{[(K \cdot a \cdot X) / G]}{[(K \cdot a \cdot Y) / L]} = \frac{L_T}{G_T}$$



CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS

Temperaturas da água na malha

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3
1	36.4	37.0	37.4	37.8	38.2	38.5	38.7	38.9	39.1	39.3	39.4
2	33.7	34.5	35.3	35.9	36.4	36.9	37.3	37.7	38.0	38.3	38.5
3	31.7	32.7	33.5	34.3	34.9	35.5	36.0	36.5	36.9	37.3	37.6
4	30.1	31.1	32.0	32.9	33.6	34.2	34.8	35.4	35.9	36.3	36.7
5	28.9	29.9	30.8	31.7	32.4	33.1	33.7	34.3	34.9	35.3	35.8
6	28.0	29.0	29.8	30.7	31.4	32.1	32.8	33.4	33.9	34.4	34.9
7	27.2	28.1	29.0	29.8	30.5	31.2	31.9	32.5	33.0	33.6	34.1
8	26.6	27.5	28.3	29.0	29.7	30.4	31.1	31.7	32.2	32.8	33.3
9	26.2	26.9	27.7	28.4	29.0	29.7	30.3	30.9	31.5	32.0	32.5
10	25.8	26.5	27.1	27.8	28.4	29.1	29.7	30.2	30.8	31.3	31.8
11	25.4	26.1	26.7	27.3	27.9	28.5	29.1	29.6	30.2	30.7	31.2
12	25.2	25.8	26.3	26.9	27.4	28.0	28.6	29.1	29.6	30.1	30.6
13	25.0	25.5	26.0	26.5	27.0	27.6	28.1	28.6	29.1	29.6	30.1
14	24.8	25.2	25.7	26.2	26.7	27.2	27.6	28.1	28.6	29.1	29.5
15	24.7	25.1	25.5	25.9	26.4	26.8	27.3	27.7	28.2	28.6	29.1
16	24.5	24.9	25.3	25.7	26.1	26.5	26.9	27.3	27.8	28.2	28.6
17	24.4	24.8	25.1	25.4	25.8	26.2	26.6	27.0	27.4	27.8	28.2
18	24.4	24.6	24.9	25.3	25.6	26.0	26.3	26.7	27.1	27.5	27.9
19	24.3	24.5	24.8	25.1	25.4	25.7	26.1	26.4	26.8	27.2	27.5

CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS

Temperaturas médias da água

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3
1	36.4	36.7	37.0	37.2	37.4	37.6	37.7	37.9	38.0	38.1	38.2
2	33.7	34.1	34.5	34.9	35.2	35.5	35.7	36.0	36.2	36.4	36.6
3	31.7	32.2	32.6	33.0	33.4	33.8	34.1	34.4	34.7	34.9	35.2
4	30.1	30.6	31.1	31.5	32.0	32.3	32.7	33.0	33.3	33.6	33.9
5	28.9	29.4	29.9	30.3	30.8	31.2	31.5	31.9	32.2	32.5	32.8
6	28.0	28.5	28.9	29.4	29.8	30.2	30.5	30.9	31.2	31.5	31.8
7	27.2	27.7	28.1	28.5	28.9	29.3	29.7	30.0	30.4	30.7	31.0
8	26.6	27.1	27.5	27.9	28.2	28.6	28.9	29.3	29.6	29.9	30.2
9	26.2	26.5	26.9	27.3	27.6	28.0	28.3	28.6	29.0	29.3	29.6
10	25.8	26.1	26.5	26.8	27.1	27.4	27.8	28.1	28.4	28.7	29.0
11	25.4	25.8	26.1	26.4	26.7	27.0	27.3	27.6	27.9	28.2	28.4
12	25.2	25.5	25.8	26.0	26.3	26.6	26.9	27.2	27.4	27.7	28.0
13	25.0	25.2	25.5	25.7	26.0	26.3	26.5	26.8	27.0	27.3	27.5
14	24.8	25.0	25.3	25.5	25.7	26.0	26.2	26.4	26.7	26.9	27.2
15	24.7	24.9	25.1	25.3	25.5	25.7	25.9	26.2	26.4	26.6	26.8
16	24.5	24.7	24.9	25.1	25.3	25.5	25.7	25.9	26.1	26.3	26.5
17	24.4	24.6	24.8	24.9	25.1	25.3	25.5	25.7	25.9	26.1	26.3
18	24.4	24.5	24.6	24.8	25.0	25.1	25.3	25.5	25.7	25.8	26.0
19	24.3	24.4	24.6	24.7	24.8	25.0	25.1	25.3	25.5	25.6	25.8

CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS

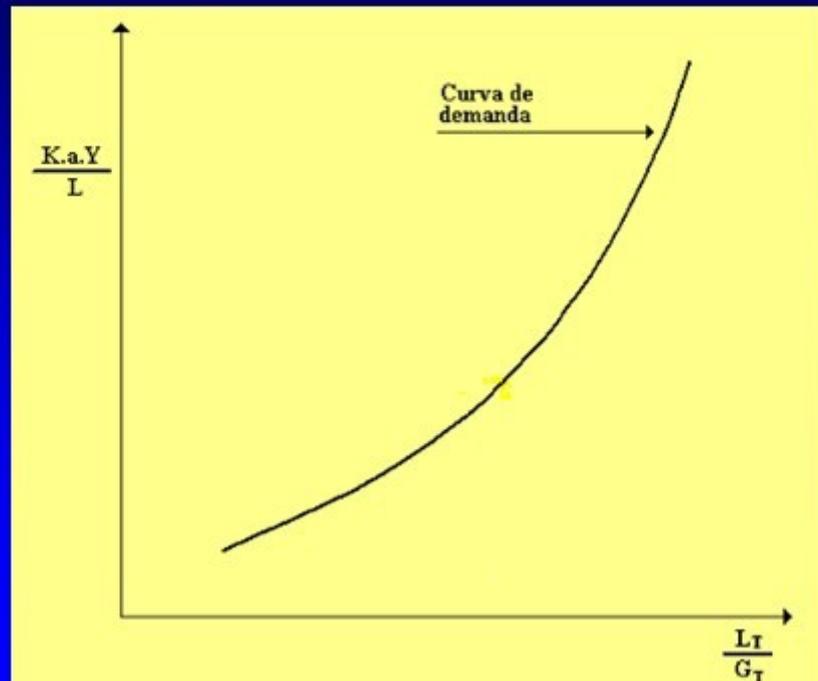
Curva de demanda

$$i/j = L_T / G_T$$

$$\frac{K \cdot a \cdot Y}{L} = j \cdot \Delta y$$

CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS

Curva de demanda



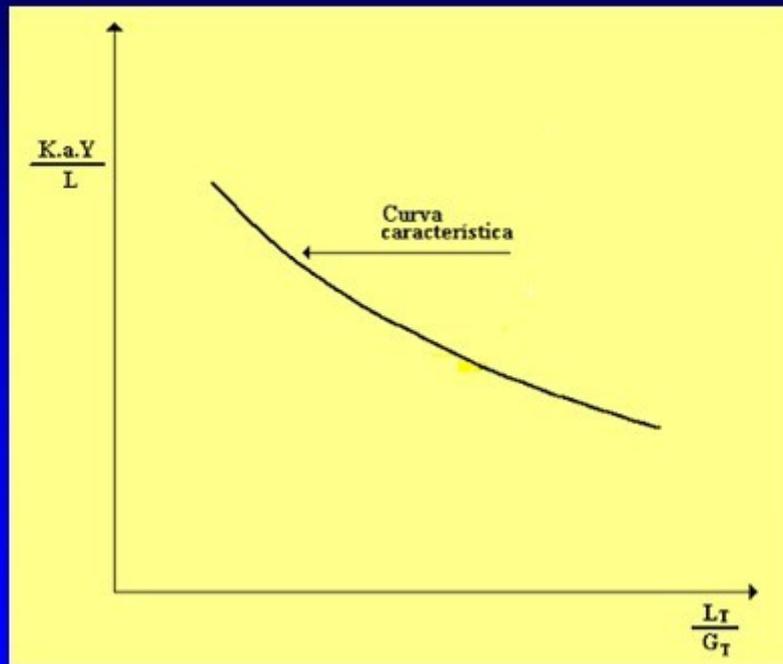
CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS

Curva característica: $K \cdot a \cdot Y / L$ vs L_T / G_T

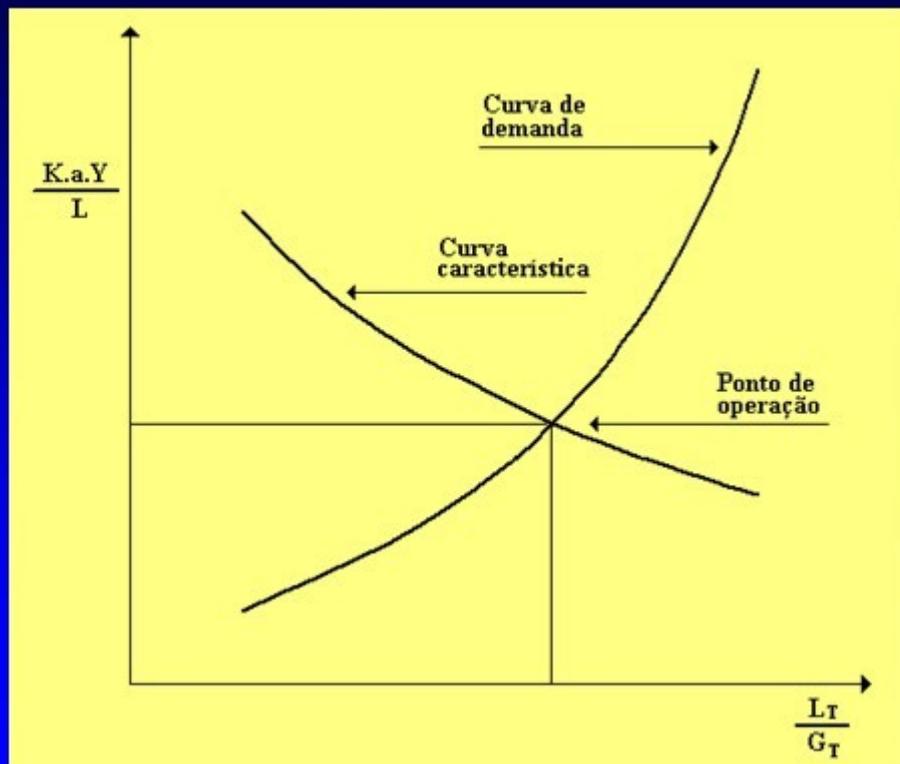
$$\frac{K \cdot a \cdot Y}{L} = C \cdot \left(\frac{L_T}{G_T} \right)^{-n}$$

CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS

Curva característica



CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS



CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS

Influência das dimensões do enchimento

$$\frac{K \cdot a \cdot Y}{L} = C_{un} \cdot Y \cdot \left(\frac{X}{Y} \right)^n \cdot \left(\frac{L_T}{G_T} \right)^{-n}$$

CÁLCULO PARA TORRES DE CORRENTES CRUZADAS

Efeito da temperatura da água quente

Hallet: redução no $K.a.Y / L$

Entre 37,8 (100 °F) e 65,5 °C (150 °F): -9% para cada 10 °C de acréscimo

Kelly: ajuste na t_{UQ} para temperaturas acima de 100 °F (aumento)

$$\Delta t_{corr.} = 0,157 \cdot (t_{UQ} - 100) - 0,00809 \cdot (t_{UQ} - 100)^2 + 0,000299 \cdot (t_{UQ} - 100)^3$$

Temperaturas em °F

CORRENTES CRUZADAS - EXEMPLO DE CÁLCULO

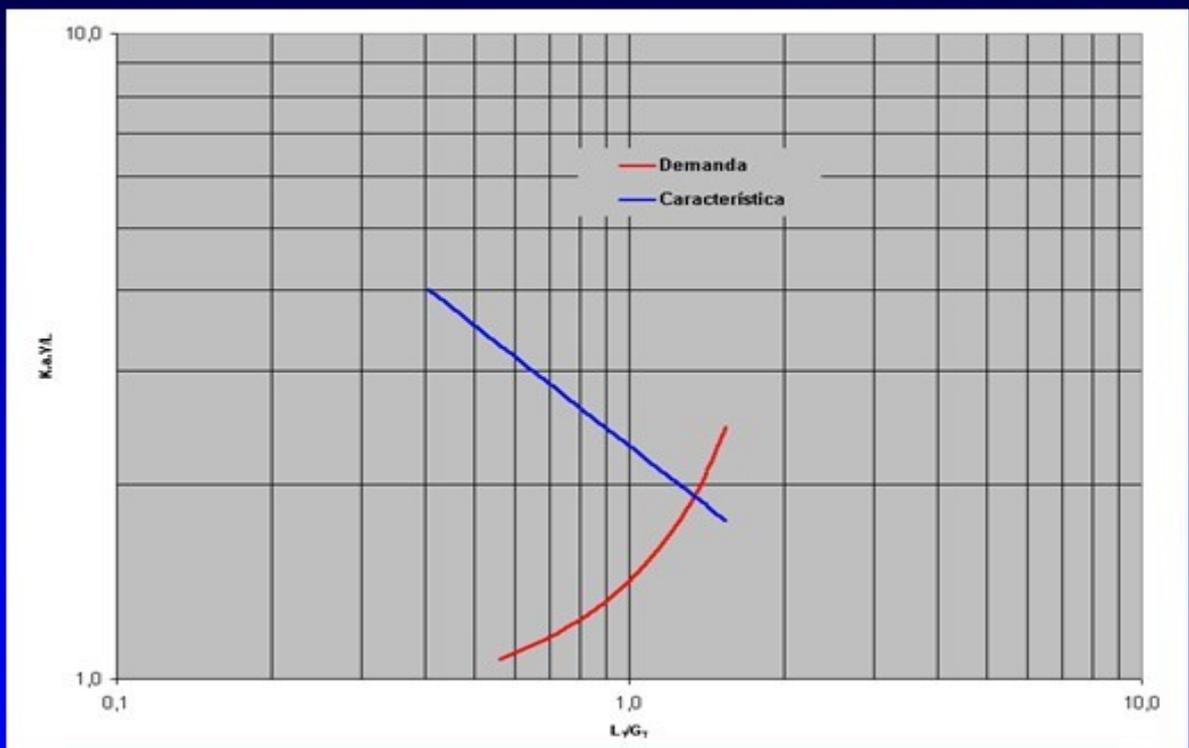
Dados de entrada:

- temperatura da água quente, t_{UQ} : 45,0 °C;
- temperatura da água fria, t_{UF} : 30,0 °C;
- temperatura de bulbo úmido do ar, t_{BU} : 24,0 °C;
- $C = 2,3000$ e $n = 0,6140$;
- altitude: 0 m;
- tamanhos de malha: 0,10 e 0,20.

Resultados:

- $L_T / G_T = 1,3420$;
- $K_a \cdot Y / L = 1,9200$;
- temperatura da água quente corrigida, $t_{UQ(corr)}$: 40,3 °C.

CORRENTES CRUZADAS - CURVAS CALCULADAS



ÁGUA DE REPOSIÇÃO E PERDAS

Água de reposição:

$$W_R = W_E + W_P$$

Ciclos de concentração:

$$R_C = \frac{W_R}{W_P}$$

Perdas:

$$W_P = \frac{W_E}{R_C - 1}$$

ENCHIMENTO

Tipos:

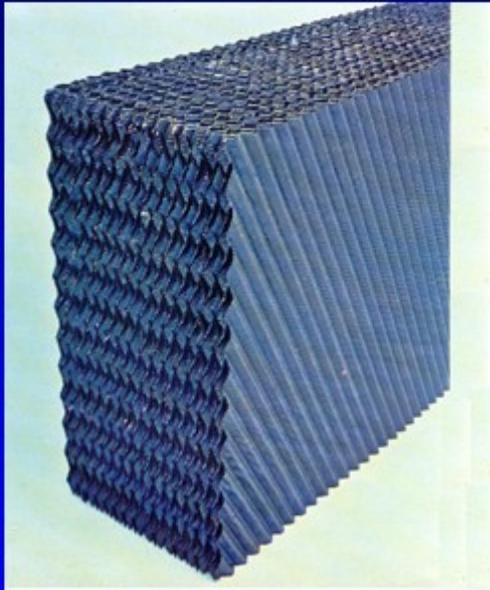
- respingamento;
- película.

Requisitos:

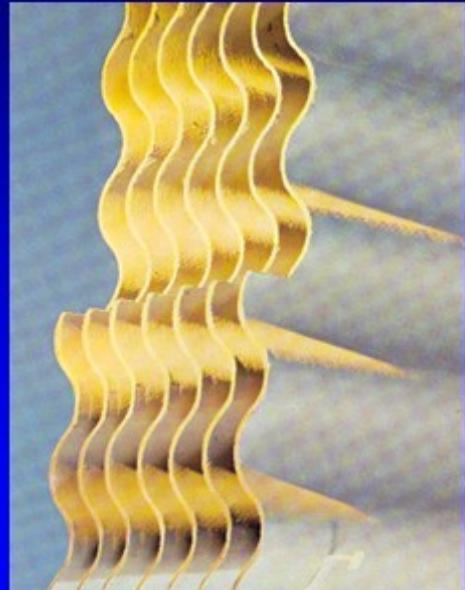
- facilidade para instalação;
- bom contato ar - água;
- baixa resistência ao fluxo de ar;
- durabilidade e resistência a contaminantes.

ENCHIMENTO TIPO PELÍCULA

Colmeia
(torres de contra corrente)

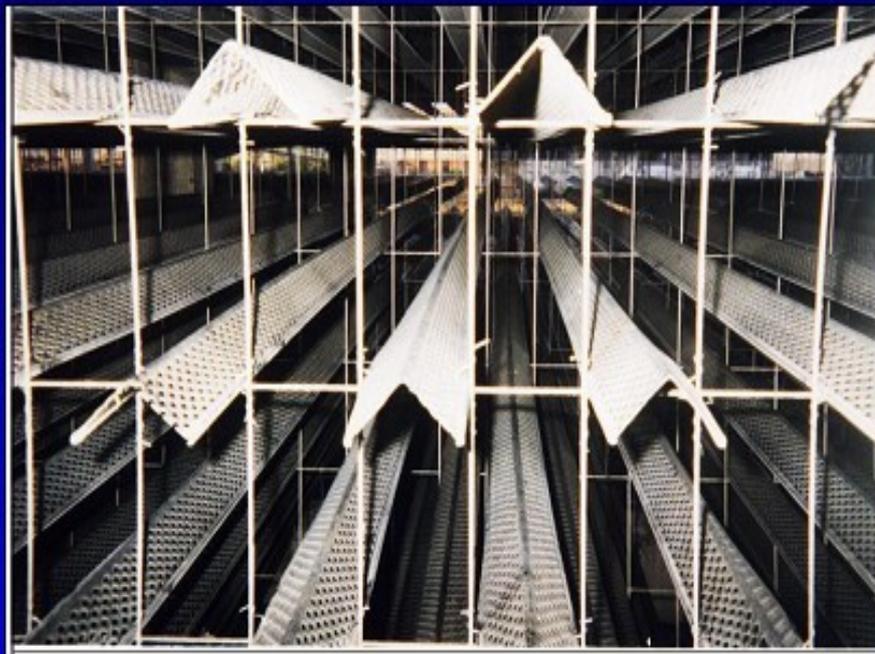


Placas
(torres de correntes cruzadas)



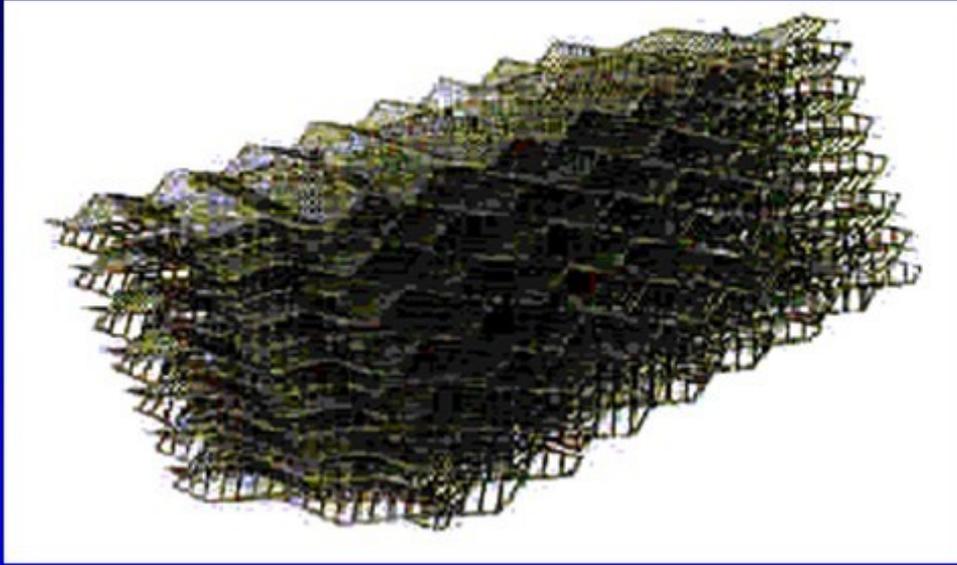
ENCHIMENTO TIPO RESPINGAMENTO

Perfis (torres de correntes cruzadas)

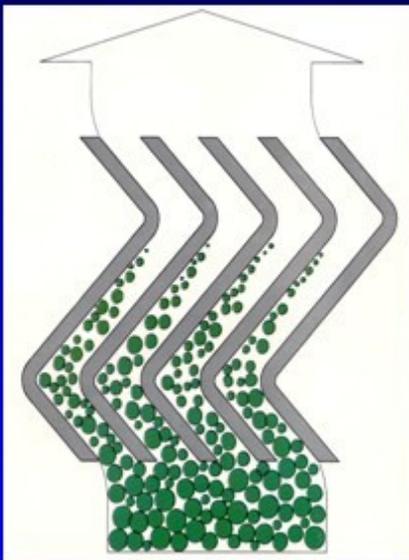


ENCHIMENTO TIPO RESPINGAMENTO

Grade (torres de contra corrente ou correntes cruzadas)

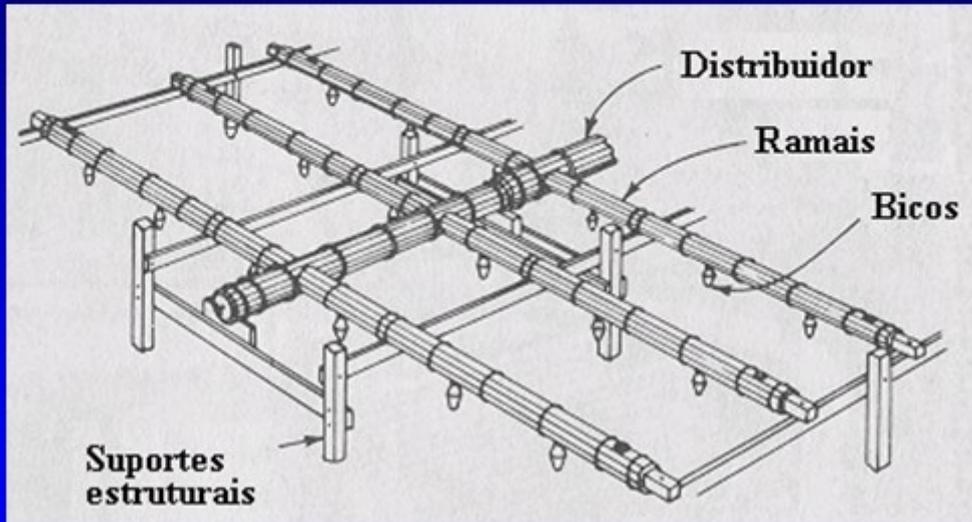


ELIMINADORES DE GOTAS



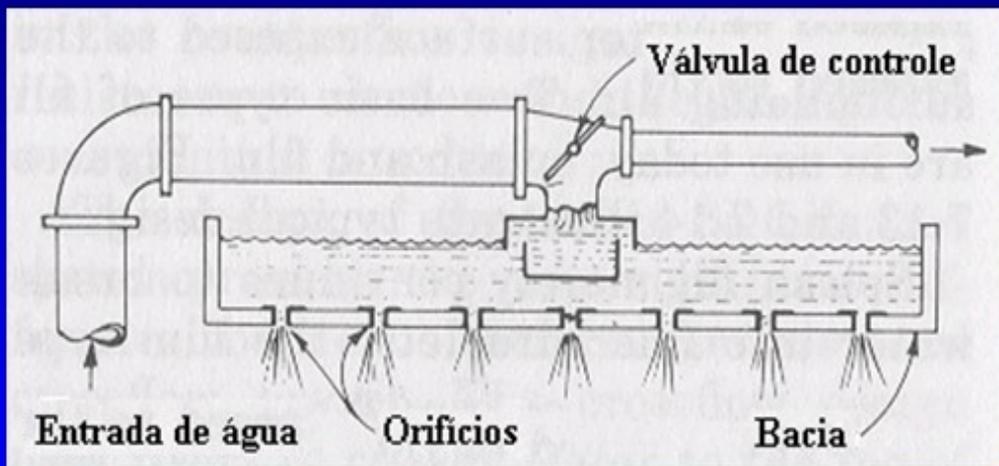
DISTRIBUIDORES DE ÁGUA QUENTE

Torres de contra corrente

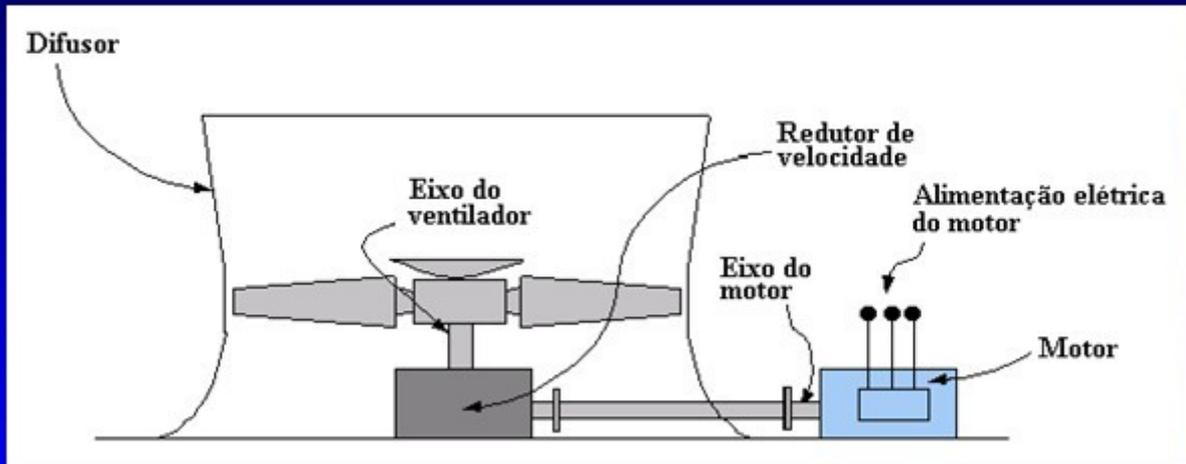


DISTRIBUIDORES DE ÁGUA QUENTE

Torres de correntes cruzadas



VENTILADORES E DIFUSORES



VENTILADORES E DIFUSORES

Pressões estática, dinâmica e total:

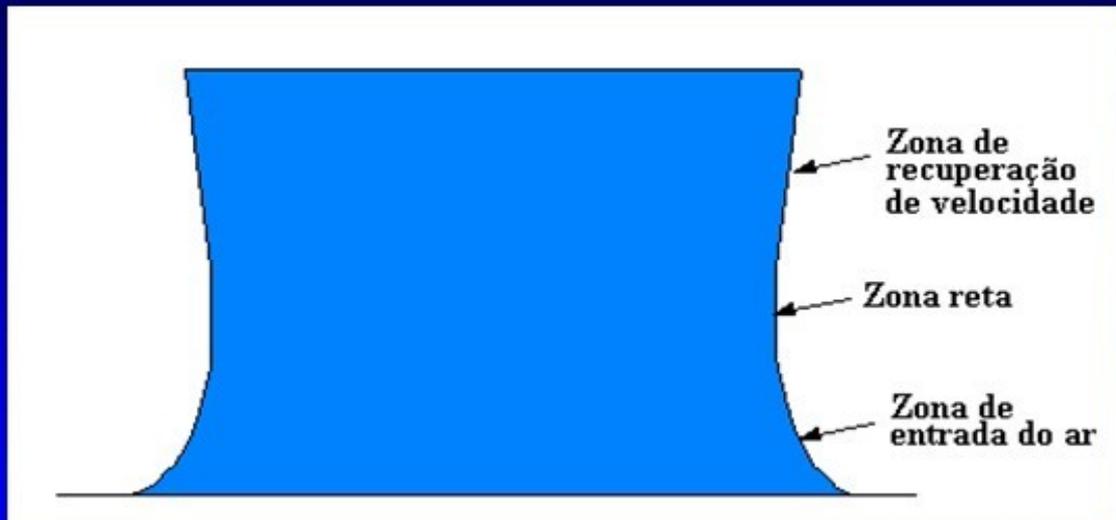
$$H_t = H_e + H_v$$

$$H_v = \frac{\rho \cdot s^2}{2}$$

VENTILADORES

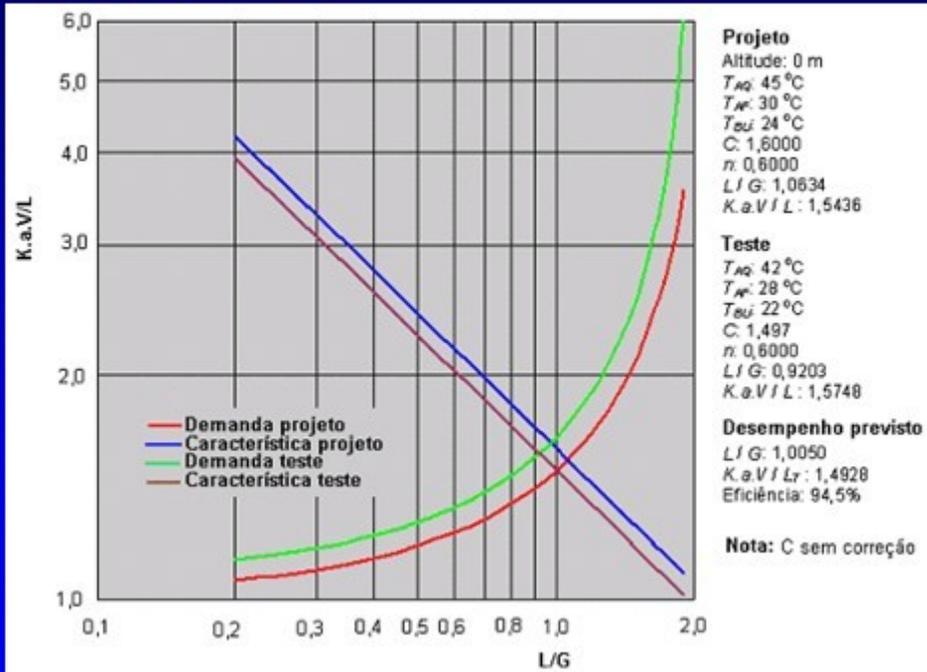


DIFUSORES



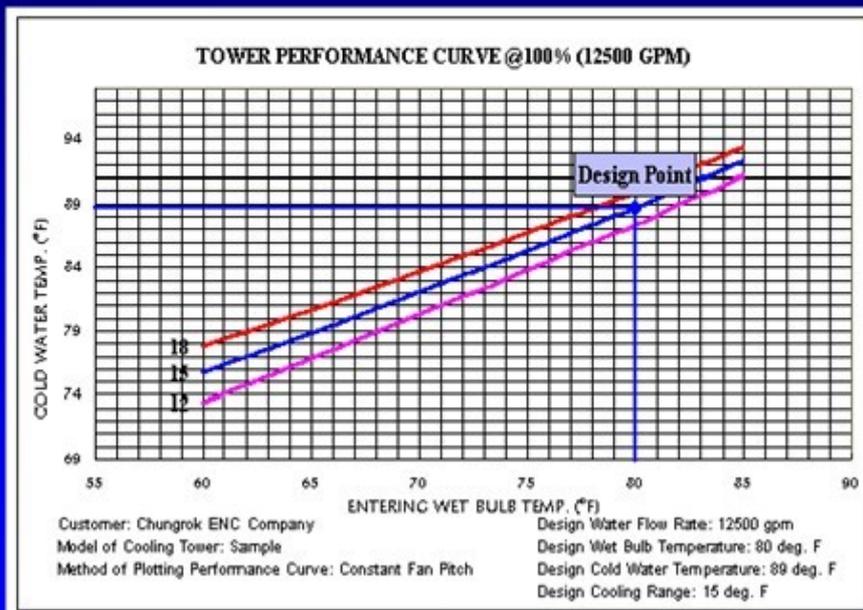
CURVAS DE DEMANDA E CARACTERÍSTICA

Resultados do teste



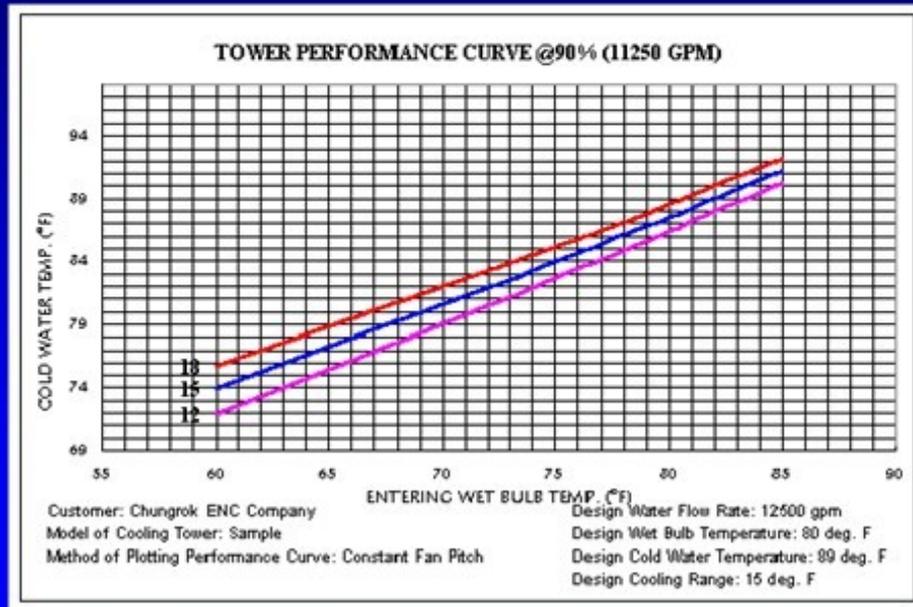
CURVAS DE DESEMPENHO

100% da vazão



CURVAS DE DESEMPENHO

90% da vazão



QUALIDADE DA ÁGUA

pH

- Ideal manter pH > 7 (reduz a corrosão)
- pH > 7,5 facilita a precipitação de carbonato de cálcio