METALURGIA EXTRATIVA DOS NÃO FERROSOS

PMT 3409

Flávio Beneduce

1) Pequenas gotas (ϕ=0,3mm), inicialmente a 1365K caem através de uma altura de 150 mm com uma velocidade média de 3m/s atingindo então um líquido de 30 mm de profundidade. A velocidade de decantação no líquido é de 3 mm/s. Dados: λ_{gota}=0,86W/m.K; ρ_{gota}=2560kg/m^3; c_{Pgota}=840J/kg.K; $h_{gás}$=40W/m^2. $h_{líquido}$=280W/m^2.K. Pede-se:

   a) Qual é a temperatura da gota no momento do impacto com o líquido;

   b) Qual é a temperatura da gota no fundo do líquido;

PARA CASA

TRANSMISSÃO DE CALOR EM REGIME TRANSIENTE

SÓLIDOS DIFERENTES DOS SÓLIDOS PADRÃO

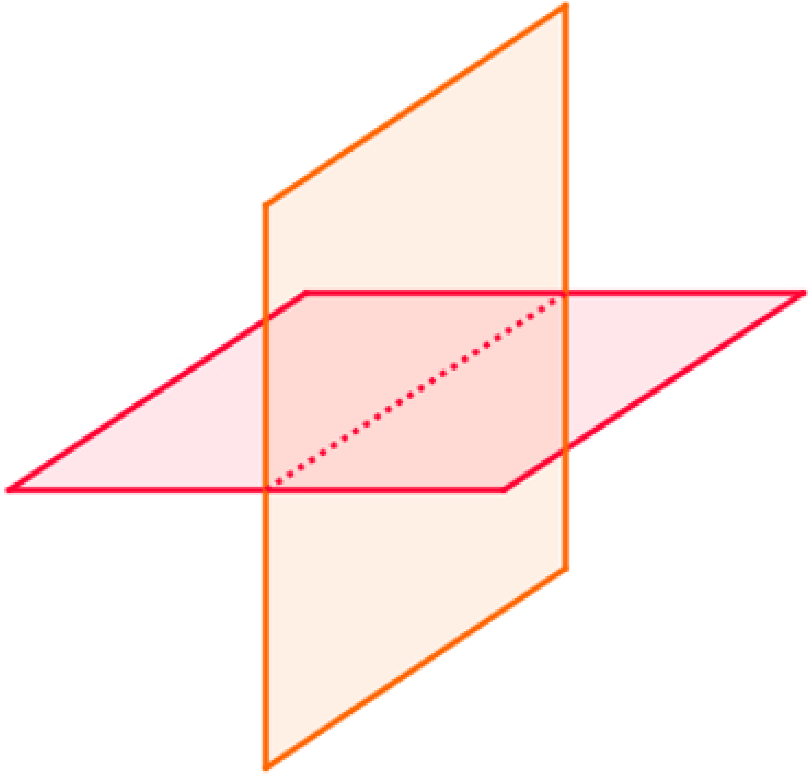
Método da solução de produto

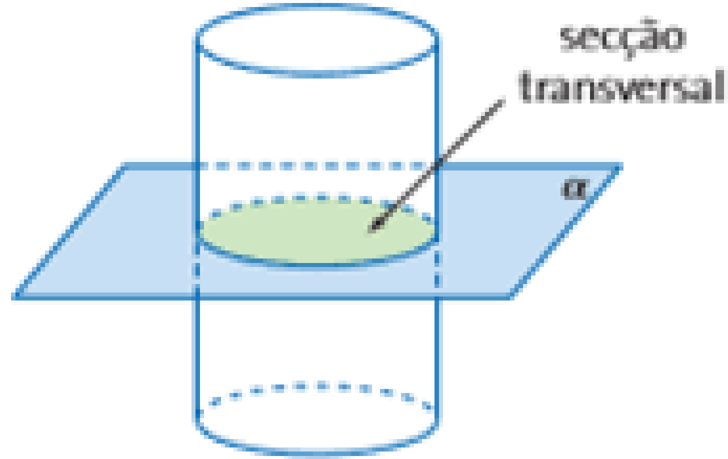
$$\theta(x,y,t) = \theta'(x,t) \times \theta''(y,t)$$

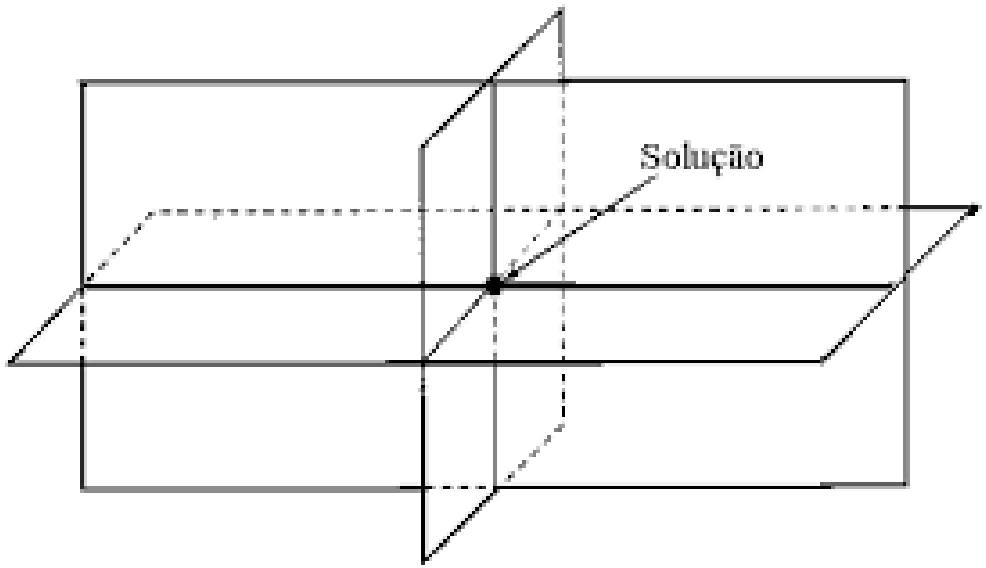
Por exemplo, para se obter:
Barra infinita de seção quadrada ou retangular:

$$\left(\frac{\theta}{\theta_i}\right)_{barra} = \left(\frac{\theta}{\theta_i}\right)_{PI,e_1} x \left(\frac{\theta}{\theta_i}\right)_{PI,e_2}$$

Se $e_1=e_2 \rightarrow$ seção quadrada e se e_1 diferente $e_2 \rightarrow$ seção retangular




secção
transversal
α


Solução

TRANSMISSÃO DE CALOR EM REGIME TRANSIENTE

a. Cilindro finito:

$$\left(\frac{\theta}{\theta_i}\right)_{CF,h,\emptyset} = \left(\frac{\theta}{\theta_i}\right)_{PI,e=h} x \left(\frac{\theta}{\theta_i}\right)_{CI,\emptyset}$$

b. Cubo ou paralelepípedo:

$$\left(\frac{\theta}{\theta_i}\right)_{cubo\ ou\ paralelep\acute{e}pedo} = \left(\frac{\theta}{\theta_i}\right)_{PI,e_1} x \left(\frac{\theta}{\theta_i}\right)_{PI,e_2} x \left(\frac{\theta}{\theta_i}\right)_{PI,e_3}$$

Se $e_1=e_2=e_3 \rightarrow$ cubo

Se um dos lados for diferente do outro $\rightarrow$ paralelepípedo

TRANSMISSÃO DE CALOR EM REGIME TRANSIENTE

Uma barra de aço de 300 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento é aquecida num forno de pré-aquecimento mantido a 1410 K como 1ª etapa de uma operação de forjamento. Pede-se calcular após a peça ter sido aquecida por 5400 s de uma temperatura inicial de 295 K

a. a temperatura do centro da barra;
b. a temperatura do centro da superfície lateral da barra;
c. a temperatura do centro da base da barra;
d. a temperatura da borda da base;

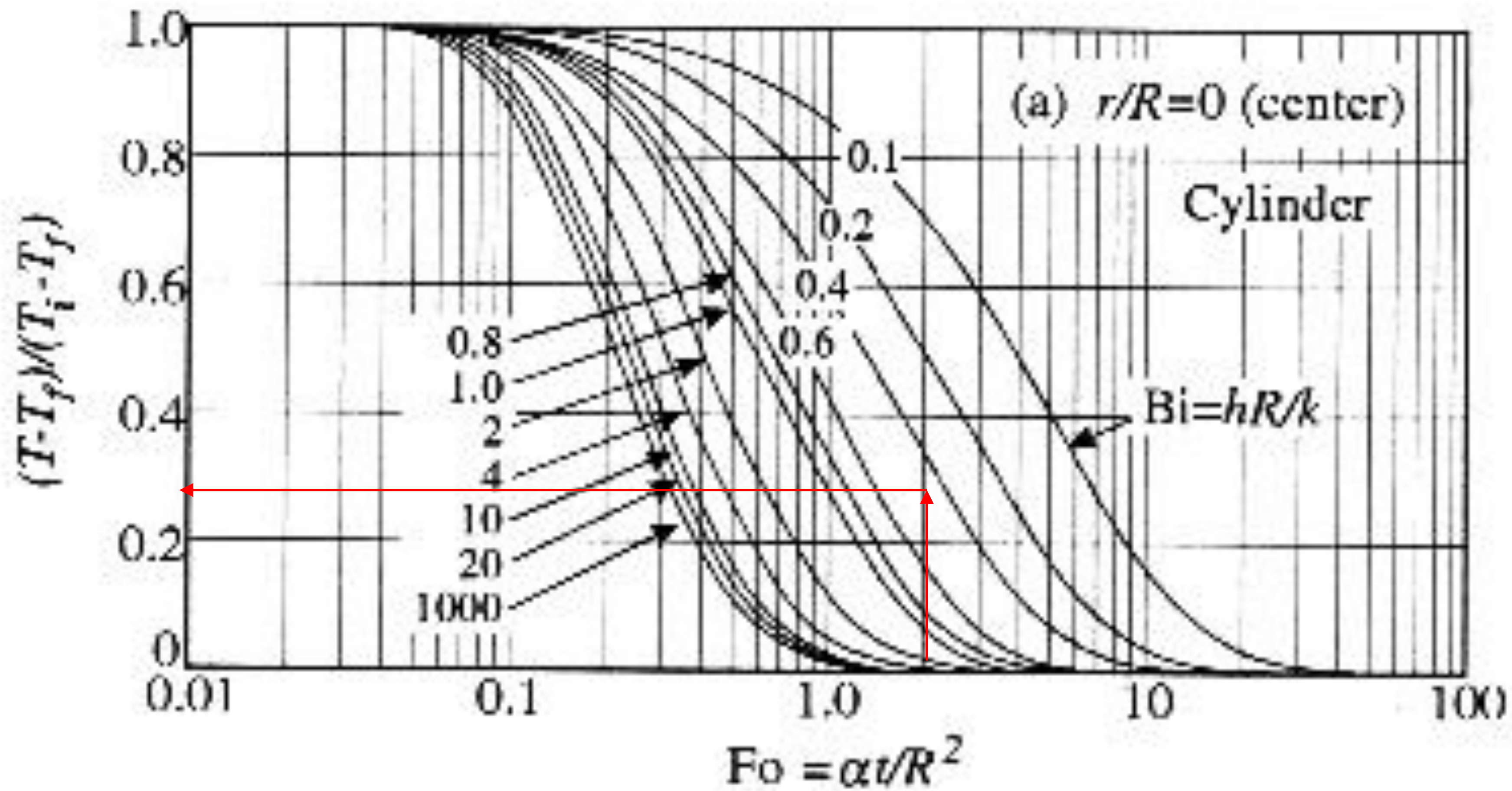
Dados: h=110 W/m^2.K; λ=35 W/m.K; ρ=7690 kg/m^3; c_P=500 J/kg.K

TRANSMISSÃO DE CALOR EM REGIME TRANSIENTE

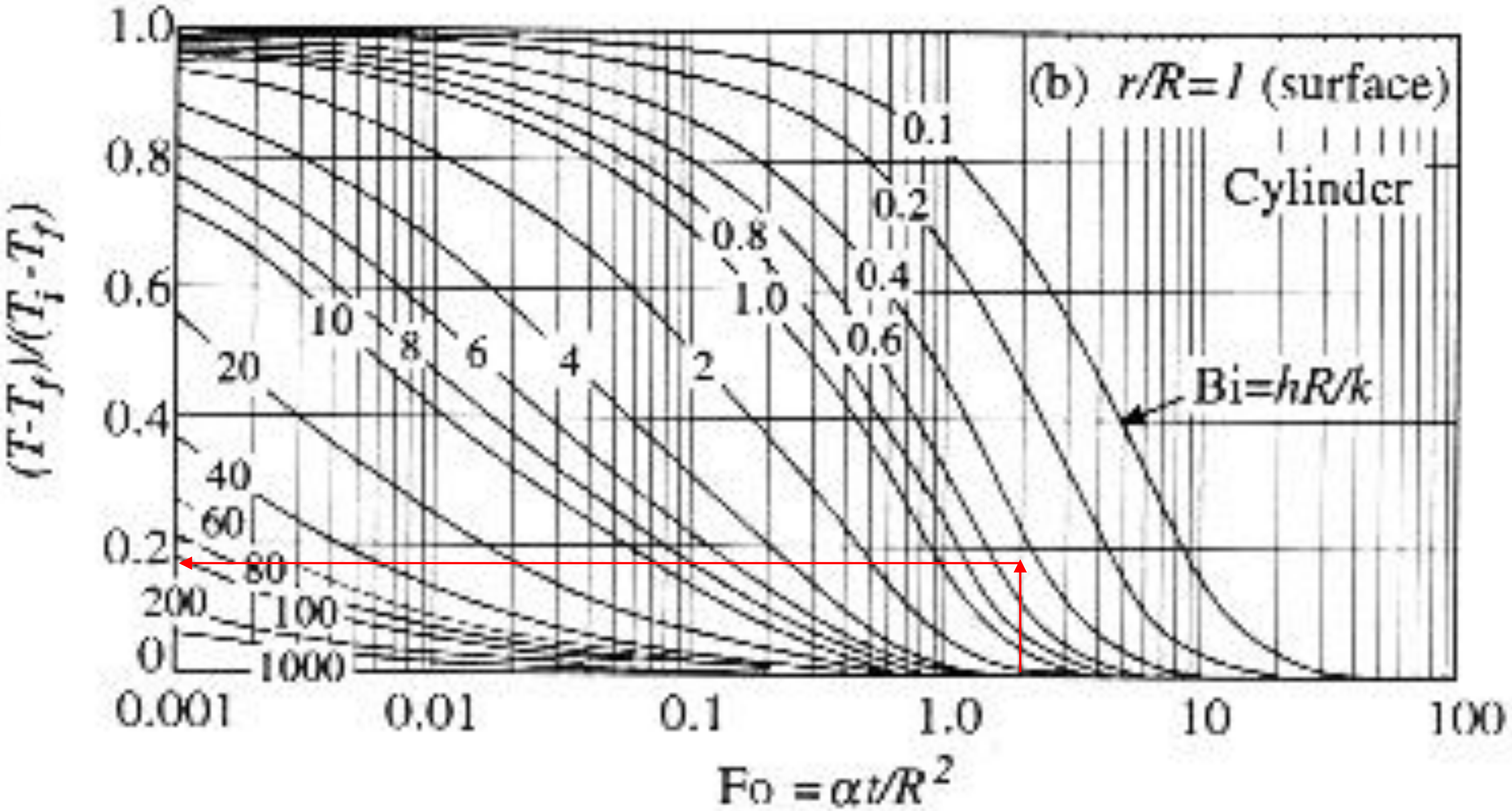
$$Bi = \frac{110.\frac{0,3}{2}}{35} = 0,471\ do\ CI\ e\ da\ PI$$

$$\alpha = \frac{35}{7690.500} = 9,1x10^{-6} m^2/s$$

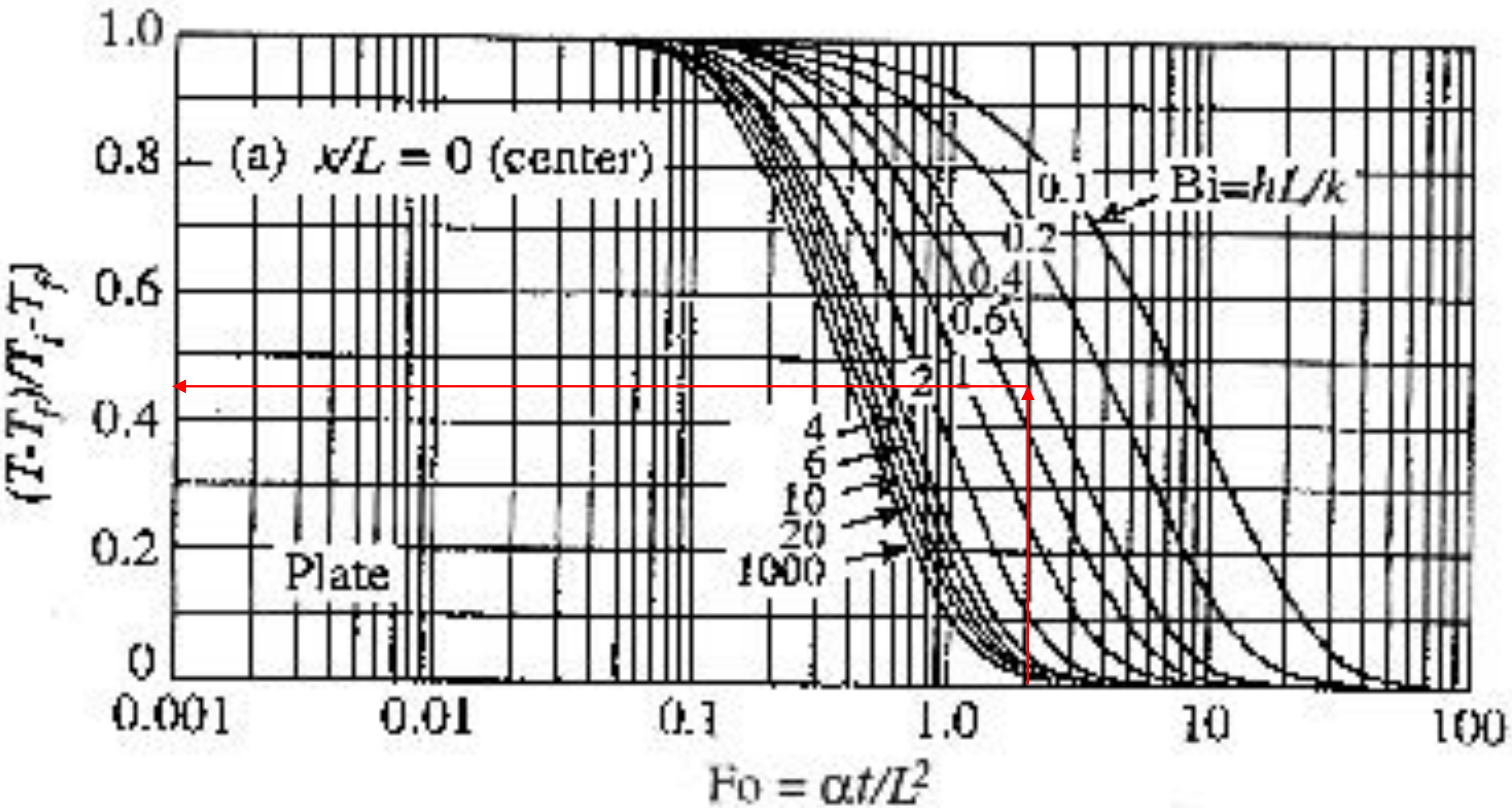
$$Fo = \frac{9,1x10^{-6}.\,5400}{(\frac{0,3}{2})^2} = 2,18$$



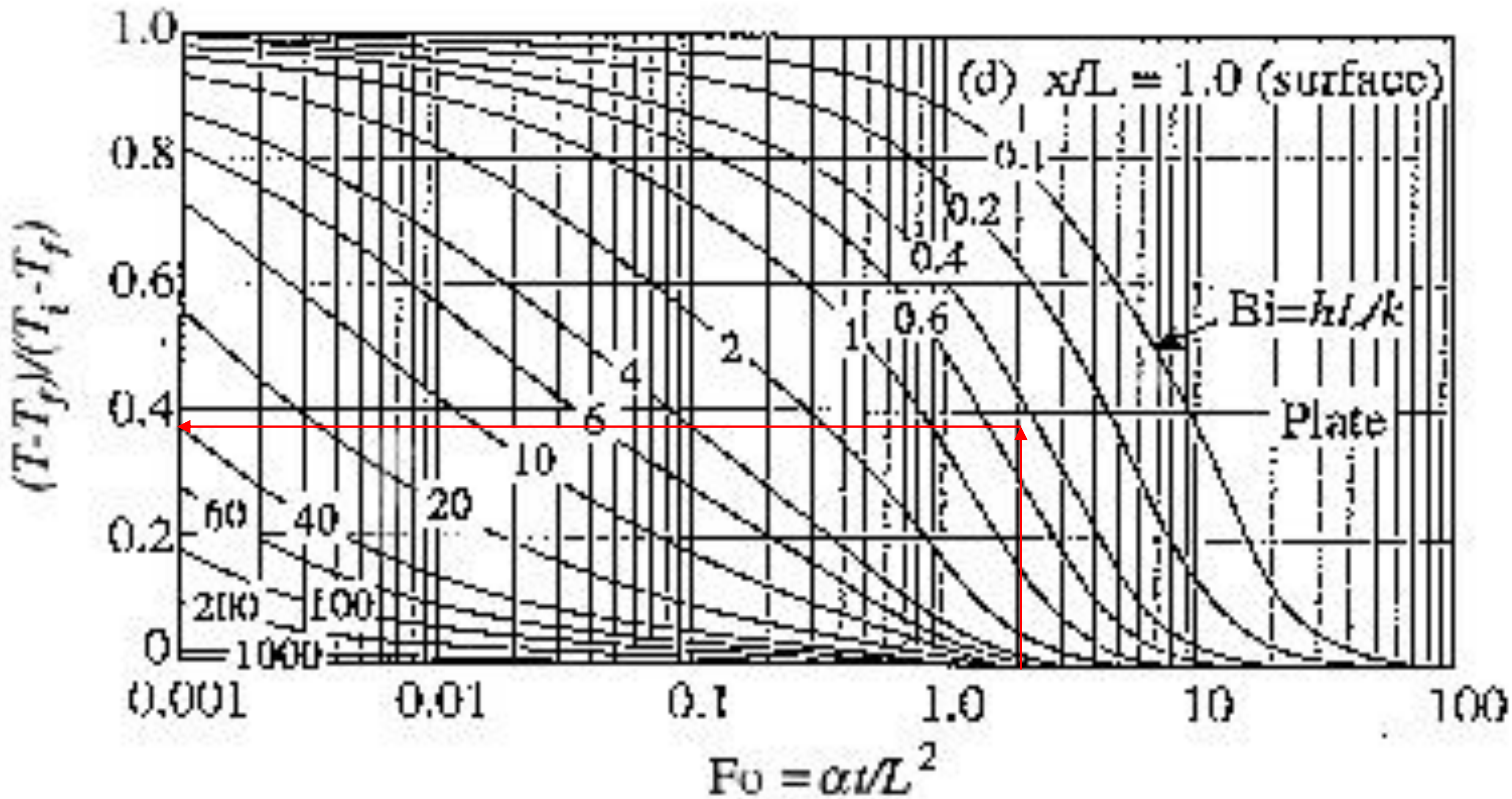
$$\theta_{CI,centro} = 0{,}28$$



$$\theta_{CI,superfície} = 0{,}16$$



$$\theta_{PI,centro} = 0{,}45$$



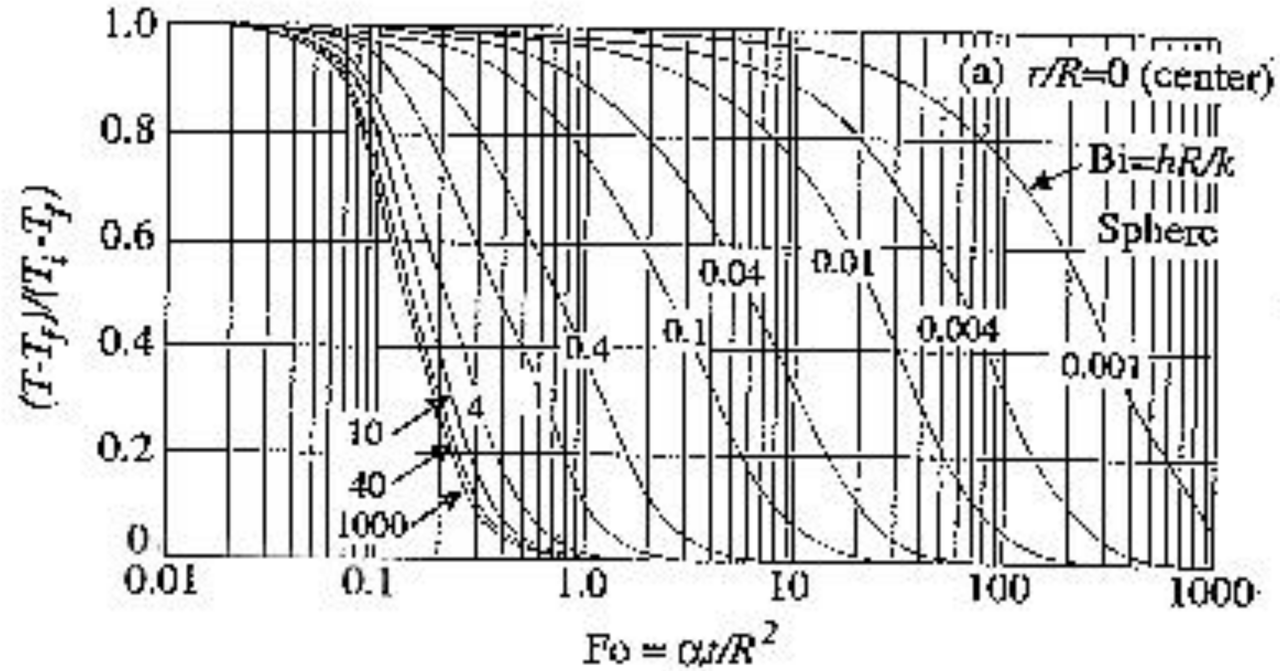
$$\theta_{PI,superfície} = 0{,}38$$

$$a)\ \theta_{CF,centro} = 0{,}28x0{,}45 = 0{,}126 = \frac{T_{centro} - 1410}{295 - 1410}$$
$$T_{centro} = 1270K$$

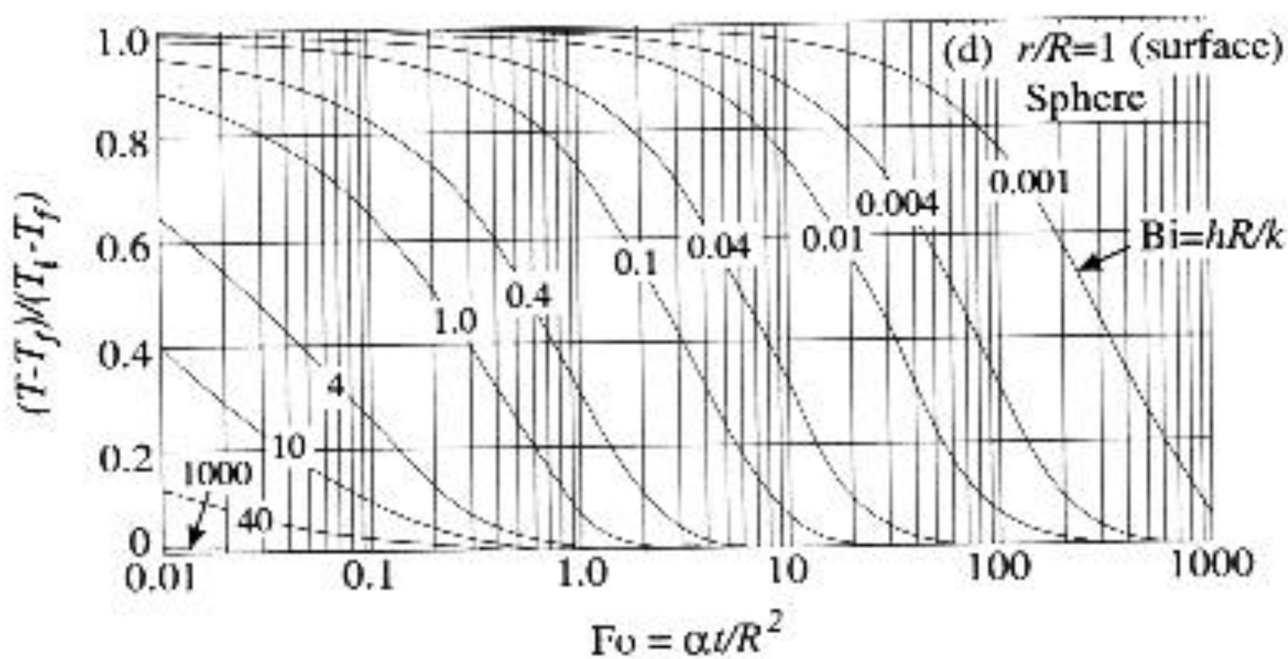
$$b)\ \theta_{CF,centro\ da\ lateral} = 0{,}16x0{,}45 = 0{,}072 = \frac{T_{cl} - 1410}{295 - 1410}$$
$$T_{cl} = 1330K$$

$$c)\ \theta_{CF,centro\ da\ base} = 0{,}28x0{,}38 = 0{,}106 = \frac{T_{cb} - 1410}{295 - 1410}$$
$$T_{cb} = 1290K$$

$$d)\ \theta_{CF,borda\ da\ base} = 0{,}16x0{,}38 = 0{,}061 = \frac{T_{bb} - 1410}{295 - 1410}$$
$$T_{bb} = 1342K$$



(a) r/R=0 (center)
Bi=hR/k
Sphere
0.04
0.01
0.1
0.4
0.004
0.001
10
4
40
1000
(T-T_f)/(T_i-T_f)
Fo = αt/R^2



(d) r/R=1 (surface)
Sphere
0.001
0.004
Bi=hR/k
0.1
0.04
0.01
1.0
0.4
4
10
1000
40
(T-T_f)/(T_i-T_f)
Fo = αt/R^2

CORRELAÇÕES ADMENSIONAIS EMPÍRICAS

$$Nu = \frac{h.L}{\lambda}(Nusselt)$$

$$(ligado\ somente\ ao\ fluido)$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}(Prandtl)$$

$$Gr = \frac{g.L^3.\beta.\Delta T}{\nu^2}(Grashof)$$

L = dimensão característica (diferente); υ = viscosidade cinemática = η/ρ
β=fator de variação da densidade com a temperatura - $\rho = \rho_o.(1+\beta.T)$
$\Delta T = T_f - T_s$ (diferença de temperatura entre o fluido e a superfície do sólido)

Nu = f(Re,Pr,Gr)

- para <u>convecção natural</u> ($v \rightarrow 0$ e $Re \rightarrow 0$): **Nu = f(Pr,Gr)**
- para <u>conveção forçada</u> ($\Delta T \rightarrow 0$ e $Gr \rightarrow 0$): **Nu = f(Re,Pr)**

CORRELAÇÕES ADMENSIONAIS EMPÍRICAS

Convecção forçada no exterior de peças
(10<Re<1.000)

$$Nu_f = 0{,}59.\,\mathrm{Re}_f^{0,47}.\,\mathrm{Pr}_f^{0,38}.\,(\frac{Pr_f}{Pr_s})^{0,25}$$

(Re>1.000)

$$Nu_f = 0{,}219.\,\mathrm{Re}_f^{0,62}.\,\mathrm{Pr}_f^{0,38}.\,(\frac{Pr_f}{Pr_s})^{0,25}$$

f e **s:** medidos à temperatura do fluido e do sólido

CORRELAÇÕES ADMENSIONAIS EMPÍRICAS

Table B.4 Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure* *(continued)*

T (K)	ρ (kg m^{-3})	C_p (kJ kg^{-1} K^{-1})	$\eta \times 10^7$ (N s m^{-2})	$\nu \times 10^6$ (m^2 s^{-1})	$k \times 10^3$ (W m^{-1} K^{-1})	$\alpha \times 10^6$ (m^2 s^{-1})	Pr
Hydrogen (H_2)							
300	0.08078	14.31	89.6	111	183	158	0.701
400	0.06059	14.48	108.2	179	226	258	0.695
500	0.04848	14.52	126.4	261	266	378	0.691
600	0.04040	14.55	142.4	352	305	519	0.678
700	0.03643	14.61	157.8	456	342	676	0.675
800	0.03030	14.70	172.4	569	378	849	0.670
900	0.02694	14.83	186.5	692	412	1030	0.671
1000	0.02424	14.99	201.3	830	448	1230	0.673
1100	0.02204	15.17	213.0	966	488	1460	0.662
1200	0.02020	15.37	226.2	1120	528	1700	0.659
1300	0.01865	15.59	238.5	1279	568	1955	0.655
1400	0.01732	15.81	250.7	1447	610	2230	0.650
1500	0.01616	16.02	262.7	1626	655	2530	0.643
1600	0.0152	16.28	273.7	1801	697	2815	0.639
1700	0.0143	16.58	284.9	1992	742	3130	0.637
1800	0.0135	16.96	296.1	2193	786	3435	0.639
1900	0.0128	17.49	307.2	2400	835	3730	0.643
2000	0.0121	18.25	318.2	2630	878	3975	0.661
Nitrogen (N_2)							
300	1.1233	1.041	178.2	15.86	25.9	22.1	0.716
400	0.8425	1.045	220.4	26.16	32.7	37.1	0.704
500	0.6739	1.056	257.7	38.24	38.9	54.7	0.700
600	0.5615	1.075	290.8	51.79	44.6	73.9	0.701
700	0.4812	1.098	321.0	66.71	49.9	94.4	0.706
800	0.4211	1.122	349.1	82.90	54.8	116	0.715
900	0.3743	1.146	375.3	100.3	59.7	139	0.721
1000	0.3368	1.167	399.9	118.7	64.7	165	0.721
1100	0.3062	1.187	423.2	138.2	70.0	193	0.718
1200	0.2807	1.204	445.3	158.6	75.8	224	0.707
1300	0.2591	1.219	466.2	179.9	81.0	256	0.701
Oxygen (O_2)							
300	1.284	0.920	207.2	16.14	26.8	22.7	0.711
400	0.9620	0.942	258.2	26.84	33.0	36.4	0.737
500	0.7698	0.972	303.3	39.40	41.2	55.1	0.716
600	0.6414	1.003	343.7	53.59	47.3	73.5	0.729
700	0.5498	1.031	380.8	69.26	52.8	93.1	0.744
800	0.4810	1.054	415.2	86.32	58.9	116	0.743
900	0.4275	1.074	447.2	104.6	64.9	141	0.740
1000	0.3848	1.090	477.0	124.0	71.0	169	0.733
1100	0.3498	1.103	505.5	144.5	75.8	196	0.736
1200	0.3206	1.115	532.5	166.1	81.9	229	0.725
1300	0.2960	1.125	588.4	188.6	87.1	262	0.721

*Condensation of Table A.4 in F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 3rd edition, John Wiley, New York, NY, 1990.

CORRELAÇÕES ADMENSIONAIS EMPÍRICAS

Table B.4 Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure*

T (K)	ρ (kg m^{-3})	C_p (kJ kg^{-1} K^{-1})	$\eta \times 10^7$ (N s m^{-2})	$\nu \times 10^6$ (m^2 s^{-1})	$k \times 10^3$ (W m^{-1} K^{-1})	$\alpha \times 10^6$ (m^2 s^{-1})	Pr
Air							
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
Carbon Dioxide (CO_2)							
300	1.7730	0.851	149	8.40	16.55	11.0	0.766
400	1.3257	0.942	190	14.3	24.3	19.5	0.737
500	1.0594	1.02	231	21.8	32.5	30.1	0.725
600	0.8826	1.08	270	30.6	40.7	42.7	0.717
700	0.7564	1.13	305	40.3	48.1	56.3	0.717
800	0.6614	1.17	337	51.0	55.1	71.2	0.716
Carbon Monoxide (CO)							
300	1.1233	1.043	175	15.6	25.0	21.3	0.730
400	0.8421	1.049	218	25.9	31.8	36.0	0.719
500	0.67352	1.065	254	37.7	38.1	53.1	0.710
600	0.56126	1.088	286	51.0	44.0	72.1	0.707
700	0.48102	1.114	315	65.5	50.0	93.3	0.702
800	0.42095	1.140	343	81.5	55.5	116	0.705
Helium (He)							
300	0.1625	5.193	199	122	152	180	0.680
400	0.1219	5.193	243	199	187	295	0.675
500	0.09754	5.193	283	290	220	434	0.668
600	-	5.193	320	-	252	-	-
700	0.06969	5.193	350	502	278	768	0.654
800	-	5.193	382	-	304	-	-
900	-	5.193	414	-	330	-	-
1000	0.04879	5.193	446	914	354	1400	0.654
Water Vapor (steam)							
380	0.5863	2.060	127.1	21.68	24.6	20.4	1.06
400	0.5542	2.014	134.4	24.25	26.1	23.4	1.04
500	0.4405	1.985	170.4	38.68	33.9	38.8	0.998
600	0.3652	2.026	206.7	56.60	42.2	57.0	0.993
700	0.3140	2.085	242.6	77.26	50.5	77.1	1.00
800	0.2739	2.152	278.6	101.7	59.2	100	1.01

CORRELAÇÕES ADMENSIONAIS EMPÍRICAS

1kgf=9,80665N

Tabela A.3(b) Propriedades físicas dos líquidos (sistema métrico) (pressão: 1,0 kgf/cm^2)

Substância	Temp. (°C)	Dens., ρ (kg/m^3)	Cal. esp., c_p $\frac{kcal}{kg\,°C}$	Viscos. dinâm., μ ($kgf\,s/m^2$)	Viscos. cinem., ν (m^2/s)	Condut. térm., k $\frac{kcal}{m\,h\,°C}$	Difus. térm., α (m^2/h)	N.º de Prandtl, Pr	Coef. exp. vol., β ($1/°C$)	Tens. sup. (kgf/m)
				$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-6}$		$\times 10^{-4}$		$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$
Água	0	999,9	1,008	1,829	1,79	0,476	4,72	13,6	−0,06	7,72
	10	999,7	1,002	1,336	1,31	0,494	4,93	9,57	+0,09	7,56
	20	998,2	0,999	1,029	1,01	0,511	5,12	7,11	0,20	7,39
	30	995,7	0,998	0,816	0,803	0,526	5,29	5,55	0,29	7,24
	40	992,3	0,998	0,676	0,668	0,540	5,45	4,41	0,8	7,08
	50	988,1	0,999	0,569	0,564	0,552	5,59	3,63	0,45	6,90
	60	983,2	1,000	0,482	0,480	0,562	5,72	3,02	0,54	6,74
	70	977,8	1,001	0,416	0,417	0,571	5,58	2,69	0,59	6,55
	80	971,8	1,003	0,365	0,368	0,578	5,93	2,23	0,65	6,37
	90	965,3	1,005	0,323	0,328	0,583	6,01	1,97	0,72	6,19
	100	958,4	1,007	0,290	0,297	0,586	6,08	1,76	0,78	6,00
	120	943,1	1,014	0,238	0,247	0,589	6,16	1,44	0,91	
	140	926,1	1,023	0,203	0,215	0,588	6,21	1,25	1,05	
	160	907,3	1,037	0,178	0,192	0,585	6,22	1,11	1,20	
	180	886,9	1,054	0,158	0,175	0,578	6,25	1,01	1,37	
	200	864,7	1,075	0,142	0,161	0,568	6,11	0,95	1,55	
	220	840,3	1,102	0,129	0,150	0,554	5,98	0,90	1,80	
	240	814	1,136	0,118	0,142	0,537	5,81	0,88		
	260	784	1,183	0,108	0,135	0,517	5,57	0,87		
	280	751	1,250	0,101	0,130	0,493	5,25	0,89		
	300	712	1,36	0,094	0,13	0,462	4,77	0,98		
	320	667	1,54	0,088	0,13	0,423	4,12	1,13		
Água pesada	5	1105,6		2,027						
	10	1106,0	1,009	1,717						
	15	1105,9	1,008	1,479						
	20	1105,4	1,006	1,285						
	25	1104,5	1,005	1,124						
	30	1103,3	1,005	0,991						
	35	1101,8	1,004	0,880						
	40	1100,0								
Amônia	−50	704	1,066	0,312	0,434	0,471	6,27	2,60		
	−30	679	1,069	0,268	0,387	0,472	6,48	2,15		4,2
	0	640	1,107	0,243	0,373	0,465	6,55	2,05		
	20	612	1,146	0,224	0,359	0,448	6,39	2,02	2,45	
	40	581	1,194	0,201	0,340	0,425	6,12	2,00		
Freon 12 ($CClF_2$)	−50	1547	0,209	0,489	0,310	0,0581	1,80	6,20		
	−30	1490	0,214	0,384	0,253	0,0596	1,90	4,79		
	0	1397	0,223	0,304	0,214	0,0626	2,01	3,83		
	20	1330	0,231	0,270	0,198	0,0626	2,02	3,53		
	40	1257	0,239	0,254	0,191	0,0596	2,00	3,44		
Óleo lubrificante	20	871	0,442	13,31	15,0	0,124	3,22	168	0,74	3,17
	40	858	0,462	6,94	7,93	0,123	3,10	92,0	0,75	
	60	845	0,482	4,26	4,95	0,122	3,00	59,4	0,75	
	80	832	0,502	2,89	3,40	0,121	2,90	42,1	0,76	
	100	820	0,522	2,04	2,44	0,120	2,80	31,4	0,77	
	120	807	0,542	1,57	1,91	0,119	2,70	25,3	0,78	
Glicerina	0	1276	0,540	10800	8310	0,243	3,54	84700		
	20	1264	0,570	1520	1180	0,245	3,40	12500	0,505	6,37
	40	1252	0,600	285	223	0,246	3,29	2450		
Álcool etílico (C_2H_5OH)	20	790	0,577	1,22	1,51	0,157	3,44	15,8	1,12	2,18
Álcool metílico (CH_3OH)	20	790	0,59	0,586	0,727	0,182	3,90	6,71	1,20	

CORRELAÇÕES ADMENSIONAIS EMPÍRICAS

Convecção forçada no interior de tubos
(Re>10.000)

$$Nu_f = 0{,}026.\mathrm{Re}_f^{0,8}.\mathrm{Pr}_f^{1/3}.(\frac{\eta_f}{\eta_s})^{0,14}$$

CORRELAÇÕES ADMENSIONAIS EMPÍRICAS

Convecção natural

$$Nu_m = c.(Gr.\mathrm{Pr})_m^n$$

m: média de temperatura entre o fluido e o sólido
c e **n:** tabelados

$(Gr.Pr)_m$	c	n
$1x10^{-3}$-$5x10^{2}$	1,18	1/8
$5x10^{2}$-$2x10^{7}$	0,54	1/4
$2x10^{7}$-$1x10^{13}$	0,135	1/3

$$\emptyset_{eq} = 2.\sqrt[3]{\frac{3.V_{peça}}{4.\pi}}$$

CORRELAÇÕES ADMENSIONAIS EMPÍRICAS

•Água flui através de uma tubulação de 50 mm de diâmetro e 3 m de comprimento a uma velocidade de 0,8 m/s. Determine o coeficiente de transferência de calor $\bar{h}$ se a temperatura média da água é de 50°C e a temperatura da parede é de 70°C.

$$Re_f = \frac{0{,}8x0{,}05x988{,}1}{0{,}569x10^{-4}x9{,}80665} = 7{,}08x10^4 > 10.000$$

$$\mathrm{Pr}_f = 3{,}63 \qquad \eta_f = 0{,}569x10^{-4}$$

$$\eta_s = 0{,}416x10^{-4}$$

$$Nu_f = 0{,}026.(7{,}08x10^4)^{0{,}8}.3{,}63^{1/3}.(\frac{0{,}569}{0{,}416})^{0{,}14}$$

CORRELAÇÕES ADMENSIONAIS EMPÍRICAS

$$Nu_f = 0{,}026.(7{,}08x10^4)^{0{,}8}.3{,}63^{1/3}.(\frac{0{,}569}{0{,}416})^{0{,}14}$$

$$Nu_f = 316{,}78 = \frac{\bar{h}.0{,}05}{0{,}552}$$

$$\bar{h} = 3497{,}2\ \frac{kcal}{h.m^2.°C} \equiv 4060{,}64 \frac{W}{m^2.°C}$$

Severidade de têmpera

O parâmetro *severidade de têmpera* (H) é um parâmetro tecnológico que relaciona as propriedades térmicas do meio e do corpo. Ela é definida pela equação:

$$H = \frac{\bar{h}}{\lambda_s}\,[L^{-1}]$$

Valores típicos de H (supondo $\lambda_{aço}$=35W/m.K).

Meio de têmpera		**H(m^{-1})**
Óleo	Sem agitação	7,9
	Agitação moderada	13,8
	Boa agitação	19,7
	Agitação vigorosa	27,6
Água	Sem agitação	39,4
	Agitação vigorosa	59,0
Salmoura	Sem agitação	78,7
	Agitação vigorosa	196

CORRELAÇÕES ADMENSIONAIS EMPÍRICAS

•Uma esfera de aço de 10 cm de diâmetro é austenitizada a 800°C e resfriada em 4 meios diferentes: ar, óleo e água a 30°C e agitados a 1 m/s além de ar parado na mesma temperatura. Determinar as severidades de têmpera e as curvas de resfriamento nos 4 casos. (β_{ar}=1/273 °C^{-1}; $\lambda_{aço}$=39 kcal/h.m.°C)

a) Ar agitado a 1 m/s

$$Re_f = \frac{1{,}0x0{,}10x1{,}1614}{184{,}6x10^{-7}} = 6{,}29x10^3 > 1.000$$

$$\mathrm{Pr}_f = 0{,}707 \qquad \mathrm{Pr}_s = 0{,}727$$

$$\bar{h} = 11{,}4\ \frac{W}{m^2.°C}$$

$$Nu_f = 43{,}2 = \frac{\bar{h}.0{,}1}{26{,}3x10^{-3}}$$

$$H = 0{,}252\ m^{-1}$$

$$Bi = \frac{11{,}4x0{,}05x3600}{39x1000x4{,}18} = 1{,}26x10^{-2} < 0{,}1$$

$$\therefore regime\ newtoniano$$

$$\frac{T-30}{800-30} = \exp\left(-\frac{11{,}4x(4x\pi x0{,}05^2)}{7849x460x\left(\frac{4x\pi x0{,}05^3}{3}\right)}.t\right)$$

$$\frac{T-30}{770} = \exp(-1{,}89x10^{-4}xt)$$

$$T = 770x\exp(-1{,}89x10^{-4}xt) + 30$$