



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

ENGENHARIA FÍSICA

FENÔMENOS DE TRANSPORTE B

Prof. Dr. Sérgio R. Montoro

sergio.montoro@usp.br

srmontoro@dequi.eel.usp.br



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

TRANSFERÊNCIA DE CALOR

ENGENHARIA FÍSICA

AULA 5

CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

PROBLEMAS COM PARÂMETRO CONCENTRADO



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

INTRODUÇÃO

Nos problemas de transferência de calor por condução até aqui considerados, as temperaturas eram independentes do tempo. Entretanto, em muitas aplicações, as temperaturas variam com o tempo. A análise destes problemas em regime transiente pode ser feita através da equação geral da condução. O presente tema trata, inicialmente, do caso unidimensional para o qual a equação geral da condução se reduz a:



CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

INTRODUÇÃO

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Equação 1

Para a solução da equação 1 são necessárias duas condições de contorno na direção x e uma no tempo. Condições de contorno, como o próprio nome diz, são frequentemente especificadas ao longo das extremidades físicas do corpo, podendo também ser internas, como, por exemplo, um gradiente de temperatura conhecido numa linha de simetria interna. Em geral, a condição no tempo é a temperatura inicial.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

NÚMEROS DE BIOT E FOURIER

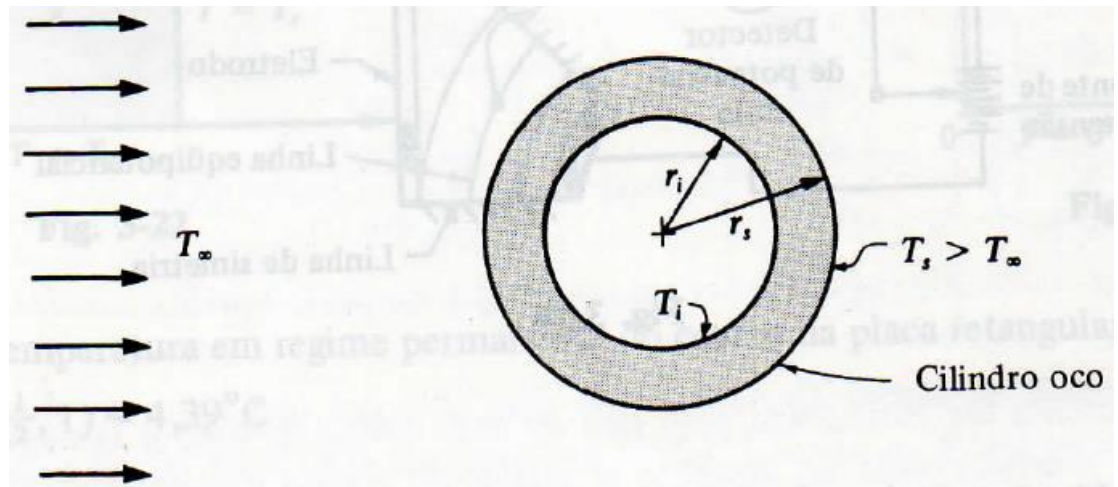
Em alguns problemas em regime transiente, os gradientes internos de temperatura no corpo podem ser muitos pequenos e de pouco interesse prático. Ainda assim a temperatura numa dada posição, ou a temperatura média do objeto, pode estar variando rapidamente com o tempo. Da equação 1 pode-se notar que este poderia ser o caso para uma difusibilidade térmica muito grande.



CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

NÚMEROS DE BIOT E FOURIER

Uma abordagem mais significativa é considerar o problema geral do resfriamento em regime transiente de um objeto, como o cilindro oco mostrado na figura abaixo.





CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

NÚMEROS DE BIOT E FOURIER

Para r_i muito grande, a taxa de transferência de calor por condução através da parede do cilindro é aproximadamente,

$$q \approx -k(2\pi r_s l) \left(\frac{T_s - T_i}{r_s - r_i} \right) = k(2\pi r_s l) \left(\frac{T_i - T_s}{L} \right) \quad \text{Equação 2}$$



CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

NÚMEROS DE BIOT E FOURIER

Onde l é o comprimento do cilindro e L a espessura do material. O fluxo de calor que deixa a superfície externa do cilindro por convecção é:

$$q = h \times (2\pi r_s l) (T_s - T_\infty) \quad \text{Equação 3}$$

Onde h é o coeficiente médio de transferência de calor por convecção ao longo de toda a superfície.



CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

NÚMEROS DE BIOT E FOURIER

Igualando a equação 2 com a equação 3, temos que:

$$\frac{T_i - T_s}{T_s - T_\infty} = \frac{hL}{k} \cong \text{Número de Biot}$$

Equação 4



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

NÚMEROS DE BIOT E FOURIER

O número de Biot é adimensional e pode ser interpretado como a razão:

$$Bi = \frac{\text{Resistência ao fluxo interno de calor}}{\text{Resistência ao fluxo externo de calor}}$$



CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

NÚMEROS DE BIOT E FOURIER

Sempre que o número de Biot for pequeno, os gradientes internos de temperatura serão também pequenos e o problema transiente pode ser tratado pelo método da “**capacidade térmica concentrada**”, onde o objeto da análise é considerado numa única temperatura média.

Na derivação anterior, a dimensão característica do corpo foi o comprimento ao longo do qual o calor se propaga por condução, $L = r_s - r_i$.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

NÚMEROS DE BIOT E FOURIER

Em geral, a dimensão característica (S) pode ser encontrada dividindo-se o volume do sólido pela sua área superficial:

$$S = \frac{V_s}{A_s}$$



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

NÚMEROS DE BIOT E FOURIER

Usando este método para a determinação de S , objetos com contornos semelhantes a placas, cilindros ou esferas podem ser considerados numa temperatura uniforme, sendo o erro resultante menor que 5% **se o número de Biot for menor que 0,1.**



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

NÚMEROS DE BIOT E FOURIER

O número de Fourier é o tempo adimensional obtido multiplicando-se o tempo pela difusibilidade térmica e dividindo-se pelo quadrado da dimensão característica.

$$\text{Tempo adimensional} = \frac{\alpha t}{S^2} \equiv Fo$$



CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

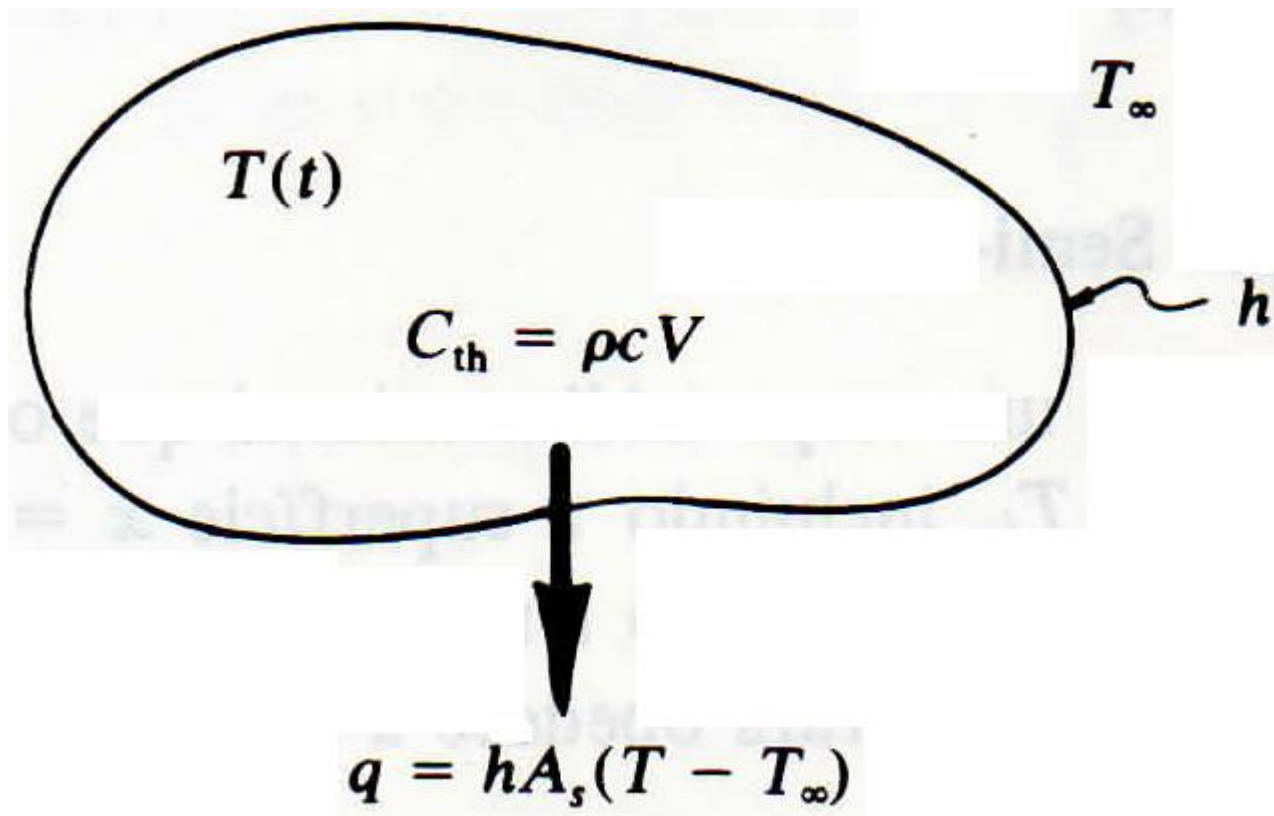
ANÁLISE CONCENTRADA

Um problema típico que pode ser tratado pela análise concentrada, se o número de Biot for adequadamente pequeno, é o do resfriamento de um objeto metálico após um processo de conformação a quente. Na figura a seguir, h é o coeficiente médio de transferência de calor para toda a área superficial A_s . Energia térmica deixa o corpo por todos os elementos da superfície; isto é mostrado por simplicidade por uma flecha.



CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

ANÁLISE CONCENTRADA





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

ANÁLISE CONCENTRADA

A primeira lei da termodinâmica aplicada a este problema fica:

$$\left(\begin{array}{c} \text{calor deixando o objeto} \\ \text{durante o tempo } dt \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{decréscimo da energia interna} \\ \text{do objeto durante o tempo } dt \end{array} \right)$$



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

ANÁLISE CONCENTRADA

PROBLEMAS UNIDIMENSIONAIS EM REGIME TRANSIENTE

Problemas com parâmetros concentrados $\Rightarrow$ temos essa classe de problemas quando:

$$T(x,t) \approx T(t)$$

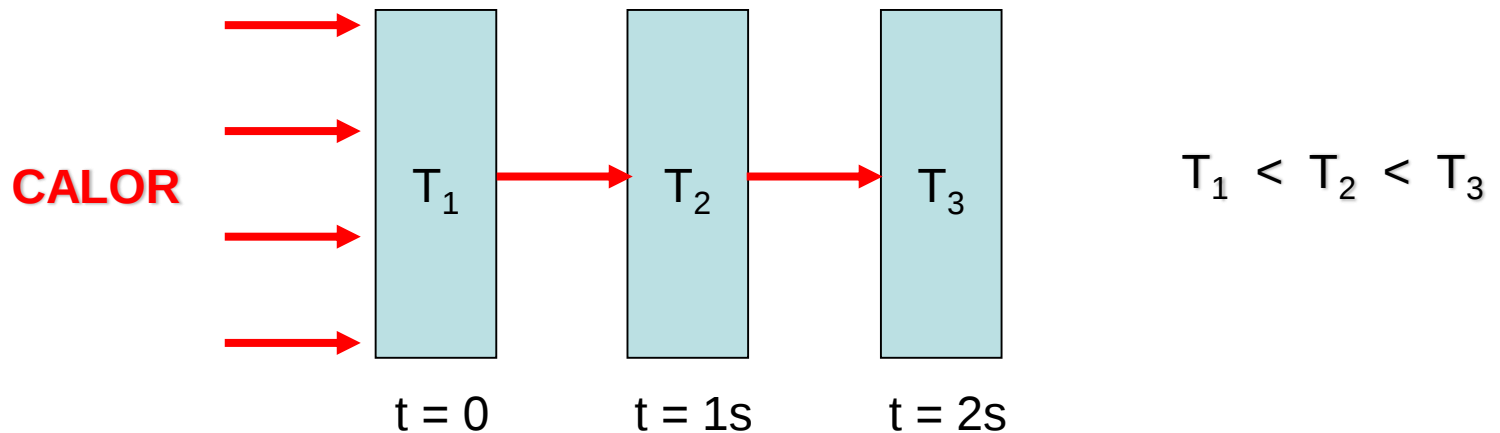


CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

ANÁLISE CONCENTRADA

PROBLEMAS UNIDIMENSIONAIS EM REGIME TRANSIENTE

Se:



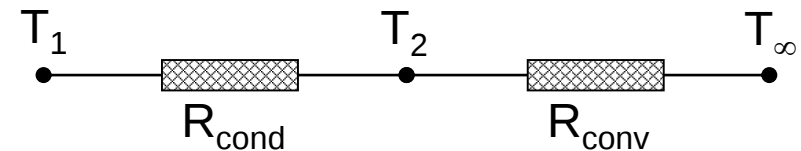
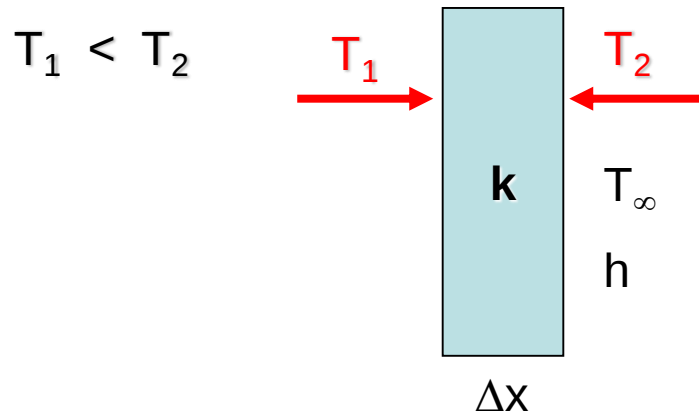


CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

ANÁLISE CONCENTRADA

PROBLEMAS UNIDIMENSIONAIS EM REGIME TRANSIENTE

Considere a situação abaixo:



$$q_{\text{cond}} = q_{\text{conv}}$$



CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

ANÁLISE CONCENTRADA

PROBLEMAS UNIDIMENSIONAIS EM REGIME TRANSIENTE

$$q_{\text{cond}} = q_{\text{conv}}$$

$$\cancel{kA} \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} = \cancel{hA} (T_2 - T_\infty)$$

$$\frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_\infty} = \frac{h\Delta x}{k}$$



CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

ANÁLISE CONCENTRADA

PROBLEMAS UNIDIMENSIONAIS EM REGIME TRANSIENTE

$$T_1 - T_2 = (T_2 - T_\infty) \times \frac{h\Delta x}{k}$$

Se: $\frac{h\Delta x}{k}$ for baixo o suficiente, $T_1 \approx T_2$

$$\frac{h\Delta x}{k} = \text{Número de Biot}$$



CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

ANÁLISE CONCENTRADA

PROBLEMAS UNIDIMENSIONAIS EM REGIME TRANSIENTE

$$Bi = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{\Delta x / kA}{1 / hA}$$

Quando a resistência de condução no sólido for inferior à resistência de convecção externa, a variação de temperatura no sólido é pequena.



CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

ANÁLISE CONCENTRADA

PROBLEMAS UNIDIMENSIONAIS EM REGIME TRANSIENTE

Biot mostrou que se $Bi \leq 0,1 \Rightarrow$ o método é aplicável

De forma geral:

$$Bi = \frac{h \times S}{k} \quad \text{onde:} \quad S = \frac{V_s}{A_s}$$



CONDUÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

ANÁLISE CONCENTRADA

EQUAÇÕES PARA O PROCESSO CONCENTRADO

$$S = \frac{V_s}{A_s}$$

$$Bi = \frac{h \times S}{k}$$

$$\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-mt}$$

$$m = \frac{h}{\rho \times c_p \times L_s}$$

OBS: $Bi \leq 0,1$ (vale a hipótese de análise transiente por parâmetros concentrados)



EXERCÍCIOS

ANÁLISE GLOBAL DO SISTEMA (PARÂMETRO CONCENTRADO)

1) Uma esfera sólida de cobre de 10 cm de diâmetro [$\rho = 8.954 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 383 \text{ J/(kg.}^\circ\text{C)}$, $k = 386 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$], inicialmente a uma temperatura uniforme $T = 250^\circ\text{C}$, é repentinamente imersa em um fluido bem agitado, que é mantido a uma temperatura uniforme $T_\infty = 50^\circ\text{C}$. O coeficiente de calor entre a esfera e o fluido é $h = 200 \text{ W/m}^2.^\circ\text{C}$.

a) Verifique se é possível aplicar a análise global do sistema.

b) Se for possível, determine a temperatura da esfera de cobre em $t = 5, 10$ e 20 minutos depois da imersão.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

EXERCÍCIOS

ANÁLISE GLOBAL DO SISTEMA (PARÂMETRO CONCENTRADO)

2) Uma barra de ferro de 1 m de comprimento, cilíndrica [$\rho = 7.800 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 460 \text{ J/(kg.}^\circ\text{C)}$, $k = 60 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$], de diâmetro $D = 5 \text{ cm}$, inicialmente na temperatura $T = 700^\circ\text{C}$, é exposta a uma corrente de ar à temperatura $T_\infty = 100^\circ\text{C}$. O coeficiente de transferência de calor entre a corrente de ar e a superfície da barra de ferro é $h = 80 \text{ W/m}^2.\text{}^\circ\text{C}$.

a) Verifique se é possível utilizar o método de análise global do sistema.

b) Se for possível, determine o tempo necessário para que a temperatura da barra atinja 300°C .



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

EXERCÍCIOS

ANÁLISE GLOBAL DO SISTEMA (PARÂMETRO CONCENTRADO)

3) Empregando a análise global do sistema, determine o tempo necessário para que uma esfera maciça de aço, com diâmetro $D = 5 \text{ cm}$ [$\rho = 7.833 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 0,465 \text{ kJ/(kg.}^\circ\text{C)}$, $k = 54 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$], esfrie de 600°C até 200°C quando exposta a uma corrente de ar a 50°C tendo um coeficiente de transferência de calor $h = 100 \text{ W/m}^2.^\circ\text{C}$.



EXERCÍCIOS

ANÁLISE GLOBAL DO SISTEMA (PARÂMETRO CONCENTRADO)

4) Uma esfera de alumínio com 3 cm de diâmetro [$\rho = 2.700 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 0,896 \text{ kJ/(kg.}^\circ\text{C)}$, $k = 204 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$] está inicialmente a uma temperatura $T = 175^\circ\text{C}$. De repente, ela é imersa em um fluido agitado a $T_\infty = 25^\circ\text{C}$. A temperatura da esfera cai para $T(t) = 100^\circ\text{C}$ em $t = 42 \text{ s}$. Calcule o coeficiente de transferência de calor.



EXERCÍCIOS

ANÁLISE GLOBAL DO SISTEMA (PARÂMETRO CONCENTRADO)

- 5) Uma esfera sólida de metal de 10 cm de diâmetro [$\rho = 8.954 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 383 \text{ J/(kg.}^\circ\text{C)}$, $k = 400 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$], inicialmente a uma temperatura uniforme $T = 230^\circ\text{C}$, é repentinamente imersa em um fluido bem agitado, que é mantido a uma temperatura uniforme $T_\infty = 40^\circ\text{C}$. O coeficiente de calor entre a esfera e o fluido é $h = 220 \text{ W/m}^2.^\circ\text{C}$.
- a) Verifique se é possível aplicar a análise global do sistema.
- b) Se for possível, determine a temperatura da esfera de metal em $t = 5, 10$ e 20 minutos depois da imersão **(RESPOSTAS: $\approx 100^\circ\text{C}$; $\approx 59^\circ\text{C}$; $\approx 42^\circ\text{C}$)**



EXERCÍCIOS

ANÁLISE GLOBAL DO SISTEMA (PARÂMETRO CONCENTRADO)

- 6) A temperatura de um fluxo de gás deve ser mantida por um termopar cuja junção pode ser aproximada como sendo uma esfera de 1,2 mm de diâmetro. As propriedades da junção são: $[k = 35 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}; \rho = 8.500 \text{ kg/m}^3 \text{ e } C_p = 320 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}]$ e o coeficiente de transferência de calor entre o gás e a junção é $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Determinar quanto tempo vai demorar para o termopar ler 99% da diferença inicial de temperatura.

(RESPOSTA: 27,8 segundos)



EXERCÍCIOS

ANÁLISE GLOBAL DO SISTEMA (PARÂMETRO CONCENTRADO)

7) Para aquecer um pouco de leite para um bebê, a mãe coloca leite em um copo de paredes finas cujo diâmetro é de 6 cm. A altura do leite no copo é de 7 cm. Ela então coloca o copo em uma panela grande cheia com água quente a 60°C. O leite é agitado constantemente, de modo que sua temperatura seja uniforme o tempo todo. Se o coeficiente de transferência de calor entre a água e o copo é de 120 W/m².°C, determinar quanto tempo vai demorar para aquecer o leite a partir de 3°C até 38°C. Tome as propriedades do leite como sendo as mesmas que as da água.

Observações: Adotar o parâmetro concentrado mesmo $Bi > 0,1$. Considerar a temperatura média do leite como sendo $(3+38)/2 = 20,5^\circ\text{C}$ e usar as propriedades da água. Para este caso, considerar as propriedades da água na temperatura de 20°C. [$k = 0,598 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$; $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ e $C_p = 4182 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$] **RESPOSTA: 5,8 min.**



EXERCÍCIOS

ANÁLISE GLOBAL DO SISTEMA (PARÂMETRO CONCENTRADO)

- 8) *"Previsão da hora da morte"* - Uma pessoa é encontrada morta às 17 horas em uma sala cuja temperatura é de 20°C. A medida da temperatura do corpo, quando encontrado, é de 25°C e o coeficiente de transferência de calor é estimado em $h = 8 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$. Modelando o corpo como um cilindro de 30 cm de diâmetro e 1,70 m de comprimento, estimar a hora da morte dessa pessoa.
- Dados:*** o corpo humano tem em média 72% de água em massa e, portanto, pode-se assumir que o corpo tem as propriedades da água na temperatura média de $(37+25)/2 = 31^\circ\text{C}$ [$\rho = 996 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 4.178 \text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$, $k = 0,617 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$] (Tabela A-9). *(Resp.: 12,2 horas antes do corpo ter sido encontrado, ou seja, a hora da morte foi às 5 horas da manhã)*



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

EXPERIMENTO

**DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM
O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS
SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA
CONSTANTE**



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

INTRODUÇÃO

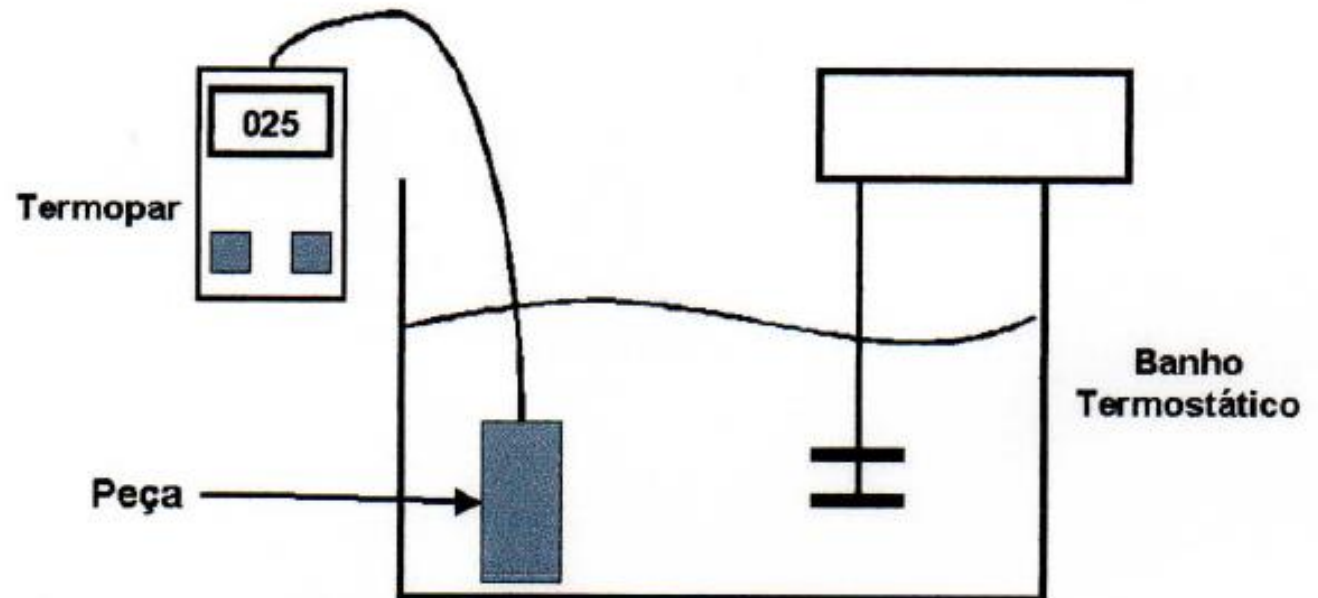
Esta experiência visa principalmente a determinação da temperatura no centro geométrico de diferentes formas sólidas (placa, cilindro e esfera). Será feita também a comparação com a análise transiente de parâmetros concentrados, objetivando verificar a validade da hipótese de parâmetros concentrados.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

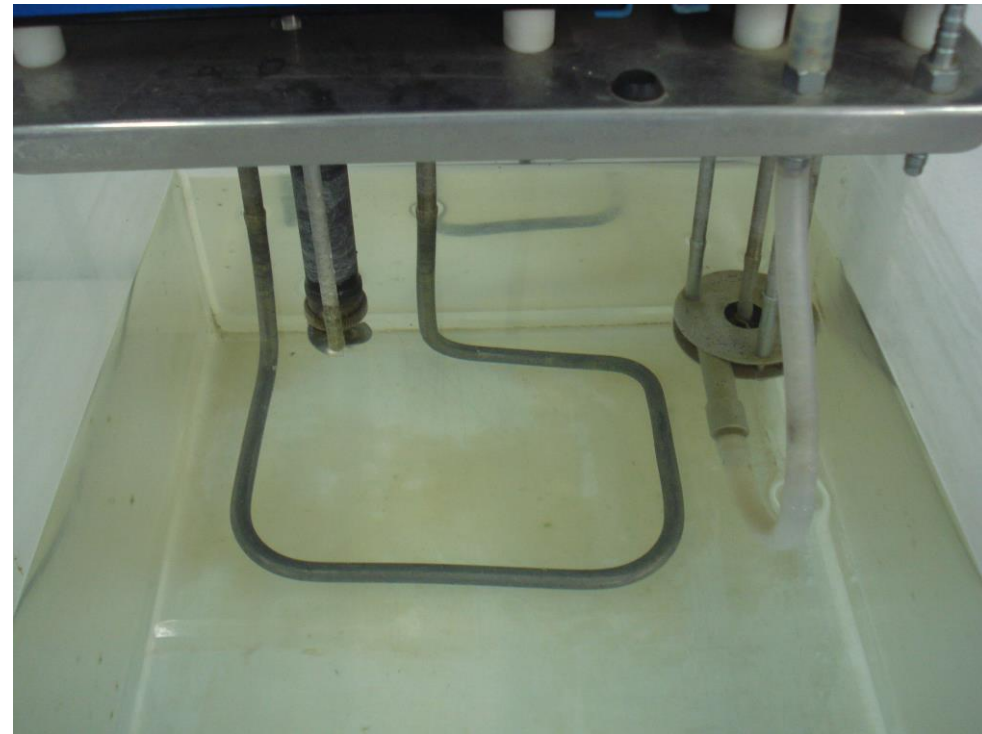
ARRANJO FÍSICO





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

ARRANJO FÍSICO





EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

EQUAÇÕES QUE REGEM O FENÔMENO

$$Bi = \frac{h \times L_s}{k_s}$$

$$L_s = \frac{V_s}{A_s}$$

$$\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-mt}$$

$$m = \frac{h}{\rho \times c_p \times L_s}$$

OBS: $Bi \leq 0,1$ (vale a hipótese de análise transiente por parâmetros concentrados)



EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

Onde:

T_0 = temperatura inicial do sólido

T_t = temperatura do sólido no tempo t

T_f = temperatura do fluido

V_s = volume do sólido

A_s = área do sólido em contato com o fluido

ρ_s = massa específica do sólido

cp_s = calor específico do sólido

h = coeficiente de convecção (valor constante neste caso)

k_s = condutividade térmica do sólido

Bi = número de Biot

L_s = comprimento equivalente



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

P1 – Colocar a peça no fluido que está mantido a uma temperatura constante, através de um banho termostático.

P2 – Acoplar o termopar no sólido.

P3 – Efetuar a leitura da temperatura (T) e o tempo (t), durante o intervalo de temperatura estabelecido pelo Professor.

P4 – Retirar a peça do fluido e imergi-la em um banho de água gelada para acelerar o arrefecimento.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

P5 - Selecionar outra peça e retornar a P1.

P6 - Os experimentos serão feitos em duplicata, e na repetição, o procedimento 4 (P4) não deverá ser realizado

P7 – Quando a repetição estiver concluída, todas as peças estarão dentro do banho termostático. Retirar todas as peças e coloca-las no ar ambiente.

P8 – Efetuar a leitura da temperatura (T) e o tempo (t), durante o intervalo de tempo estabelecido pelo Professor.



OBSERVAÇÃO: os dados contidos nas tabelas mostradas a seguir deverão ser entregues ao professor ao término do experimento. O grupo deverá providenciar uma cópia para que possam elaborar o relatório.

Material:						Fluido:					
Dimensões:						Temperatura:					
Medições	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T (°C)											
t ₁ (s)											
t ₂ (s)											



NO TOTAL SERÃO 12 TABELAS:

[illegible][illegible]



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

Geometrias:

- ✓ Placa
- ✓ Cilindro
- ✓ Esfera

Materiais:

- Cobre e Alumínio





EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

RESULTADOS

➤ Plotar os gráficos:

- ✓ Temperatura x tempo (experimental)
- ✓ Temperatura x tempo (teórico)

Comparar e discutir os resultados encontrados.

$$e(\%) = \frac{|t_{\text{exp}} - t_{\text{teór}}|}{t_{\text{teór}}} \times 100$$



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

RELATÓRIO

$$h_{\text{água}} = 1500 \text{ W/m}^2.\text{°C}$$

$$h_{\text{ar}} = 15 \text{ W/m}^2.\text{°C}$$



EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

RELATÓRIO

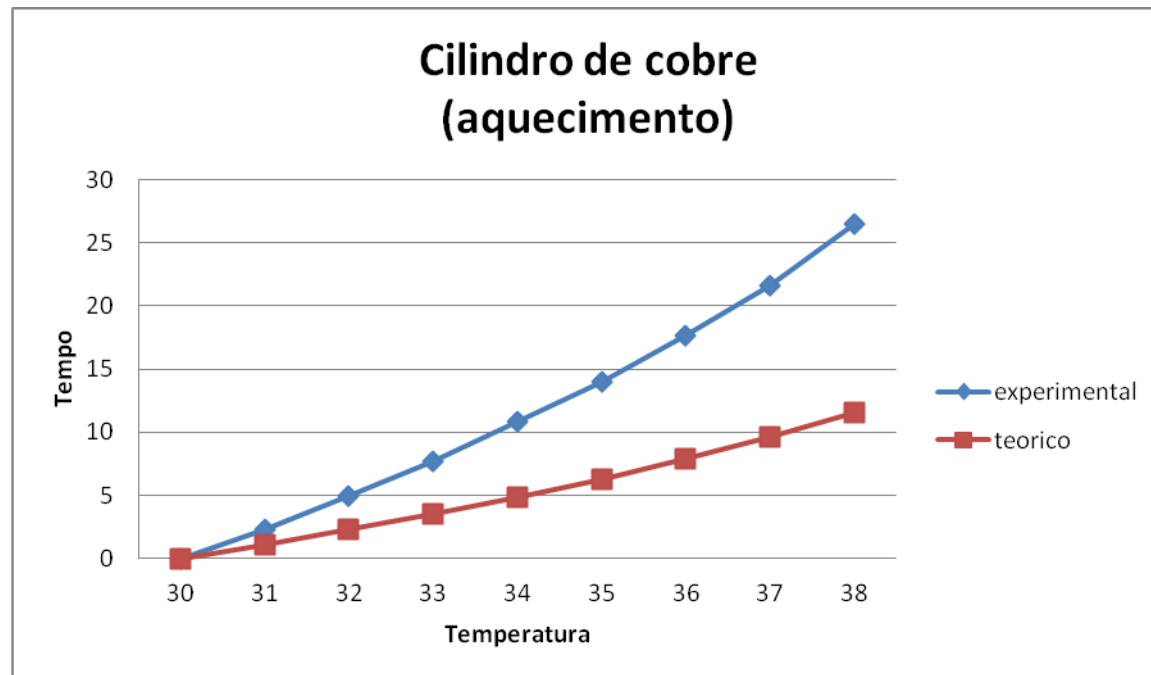


DIMENSÕES DAS FORMAS GEOMÉTRICAS		
PLACA (Al e Cu)	CILINDRO (Al e Cu)	ESFERA (Al e Cu)
Espessura = 13 mm Largura = 102 mm Comprimento = 153 mm	Diâmetro = 50 mm Altura = 153 mm	Diâmetro = 51 mm



EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

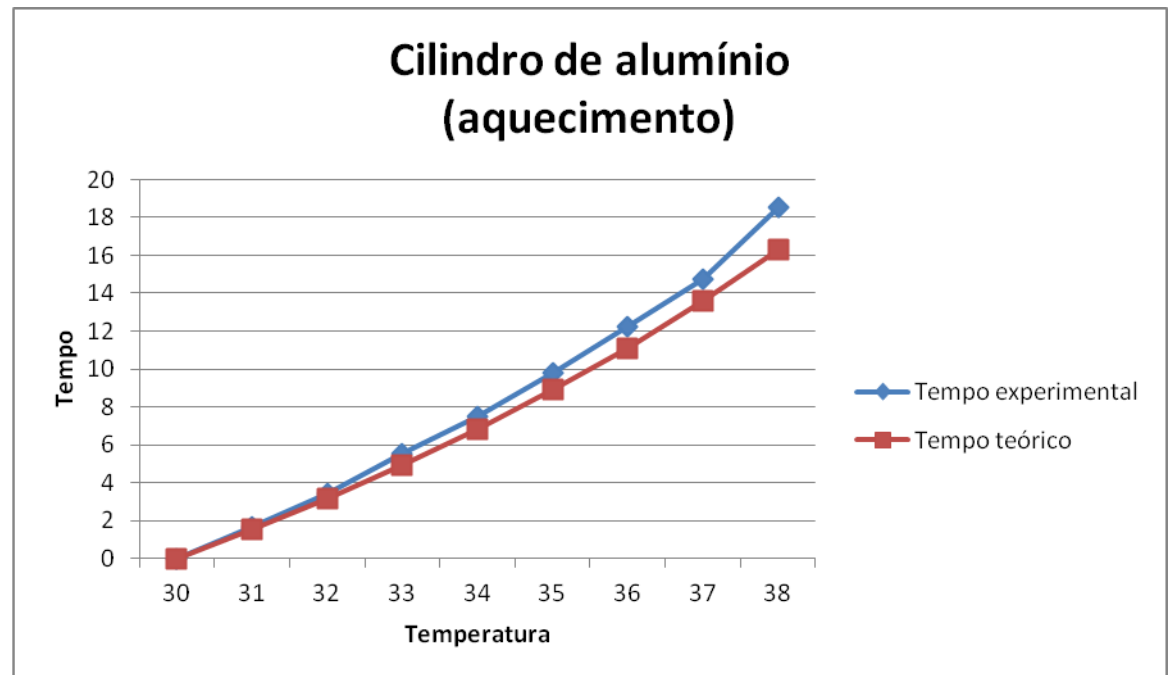
ETAPA DE AQUECIMENTO





EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

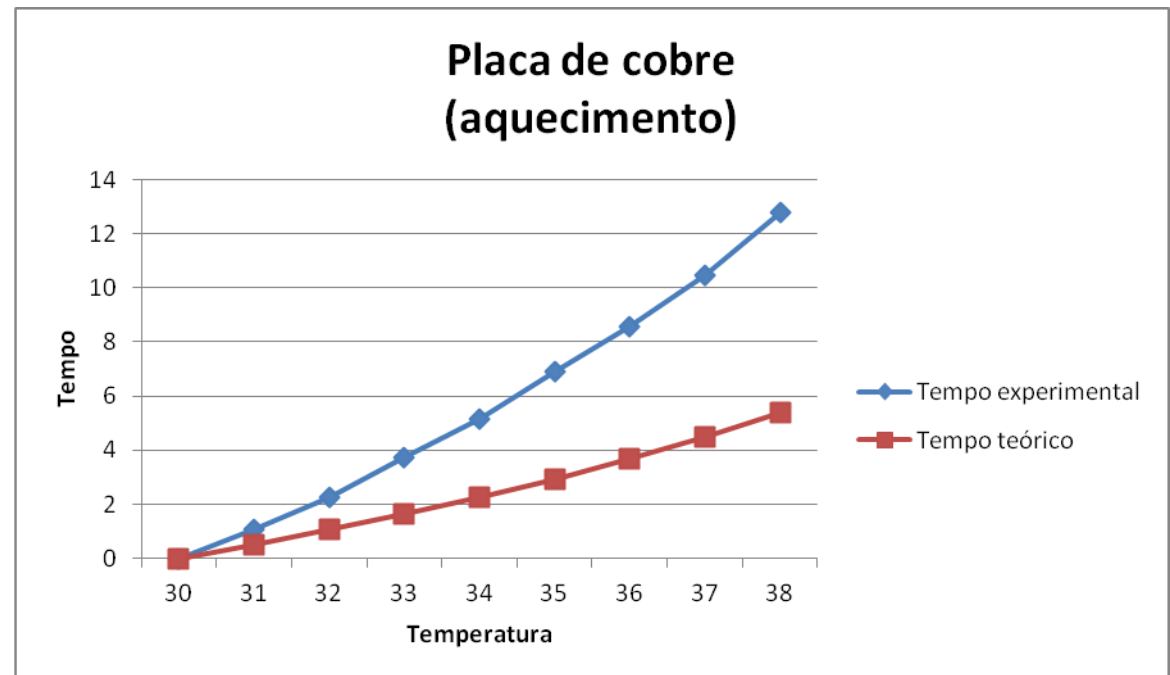
ETAPA DE AQUECIMENTO





EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

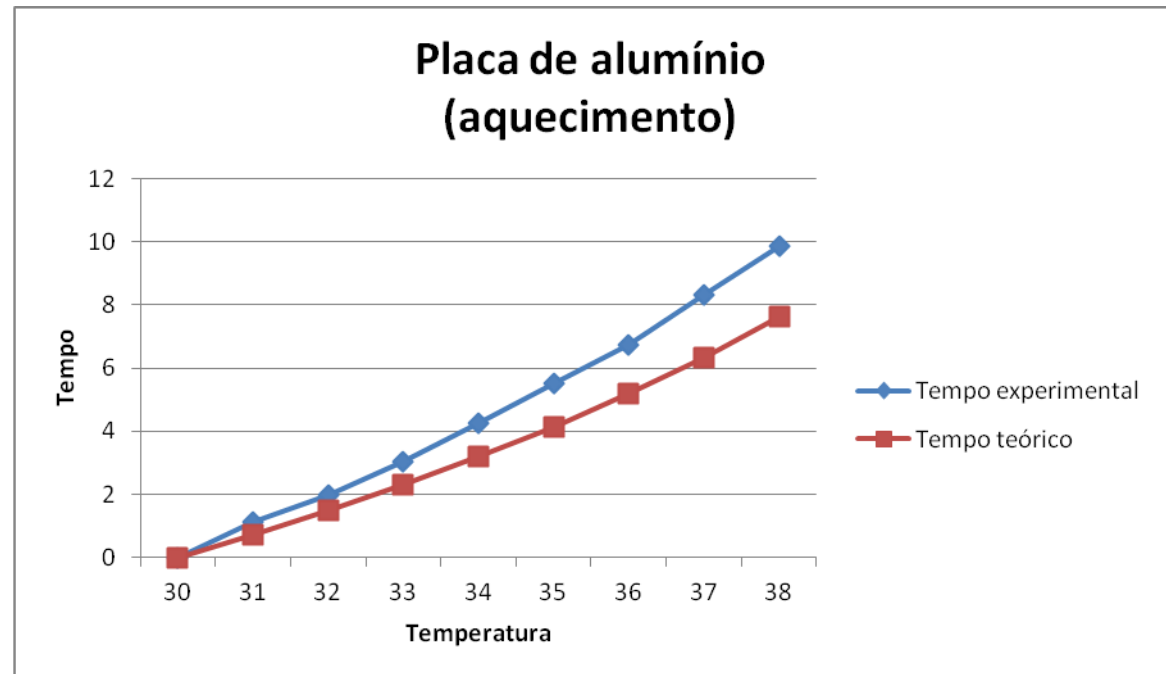
ETAPA DE AQUECIMENTO





EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

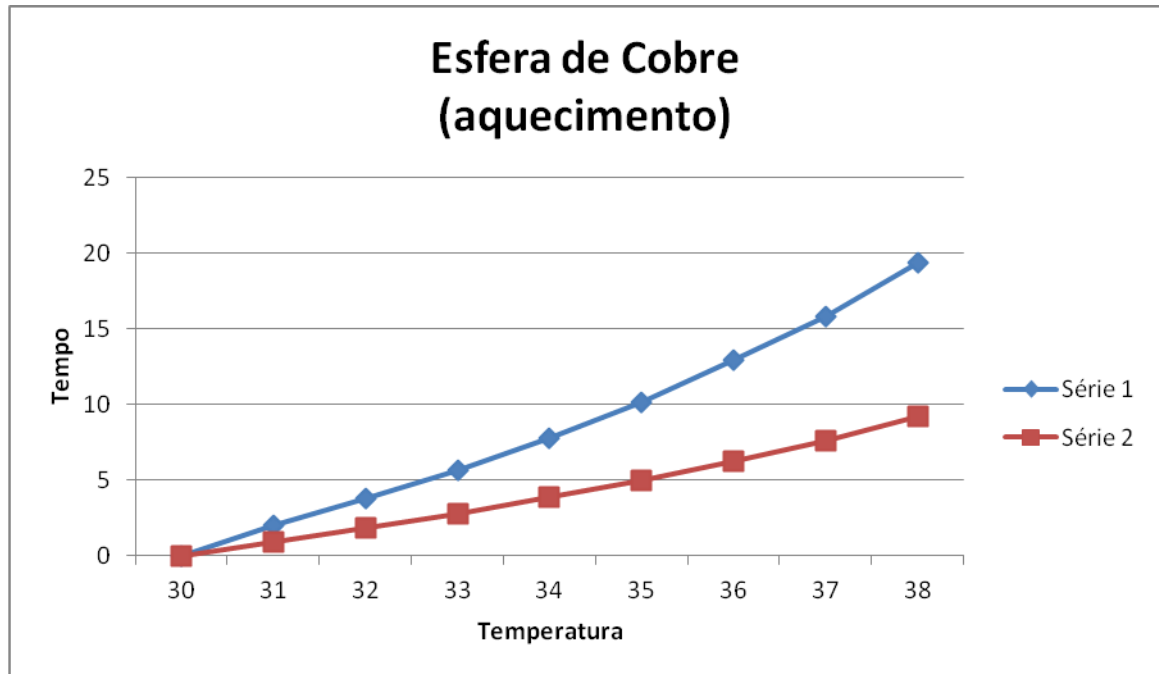
ETAPA DE AQUECIMENTO





EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

ETAPA DE AQUECIMENTO

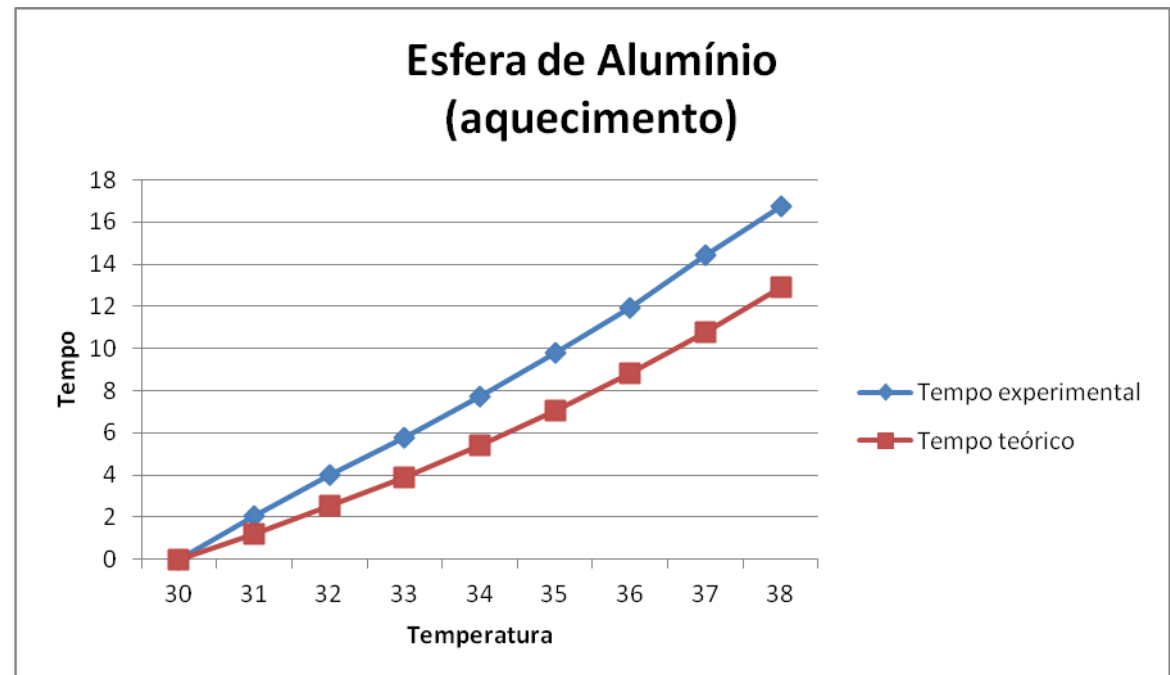




UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

ETAPA DE AQUECIMENTO

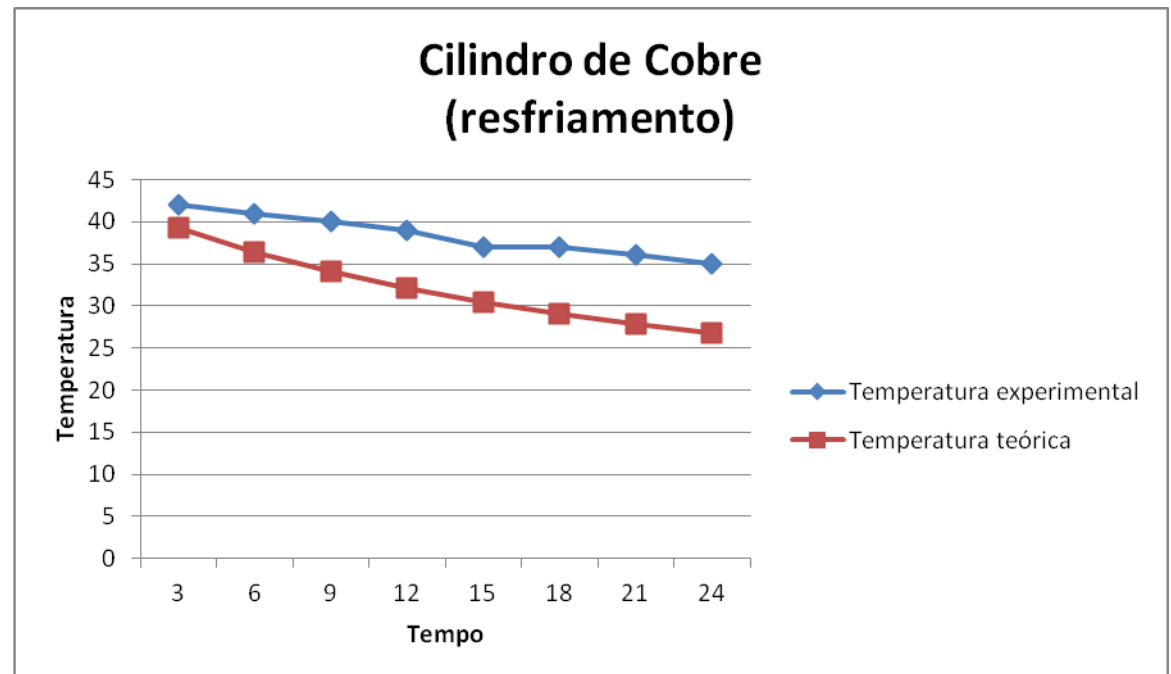




UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

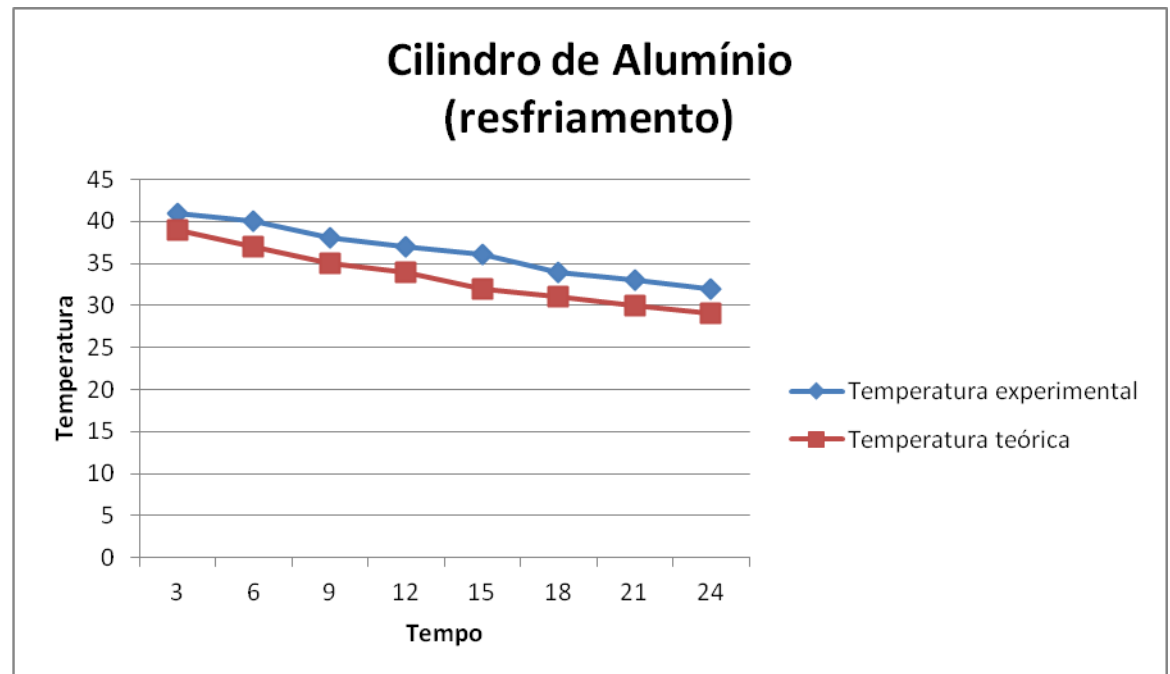
ETAPA DE RESFRIAMENTO





EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

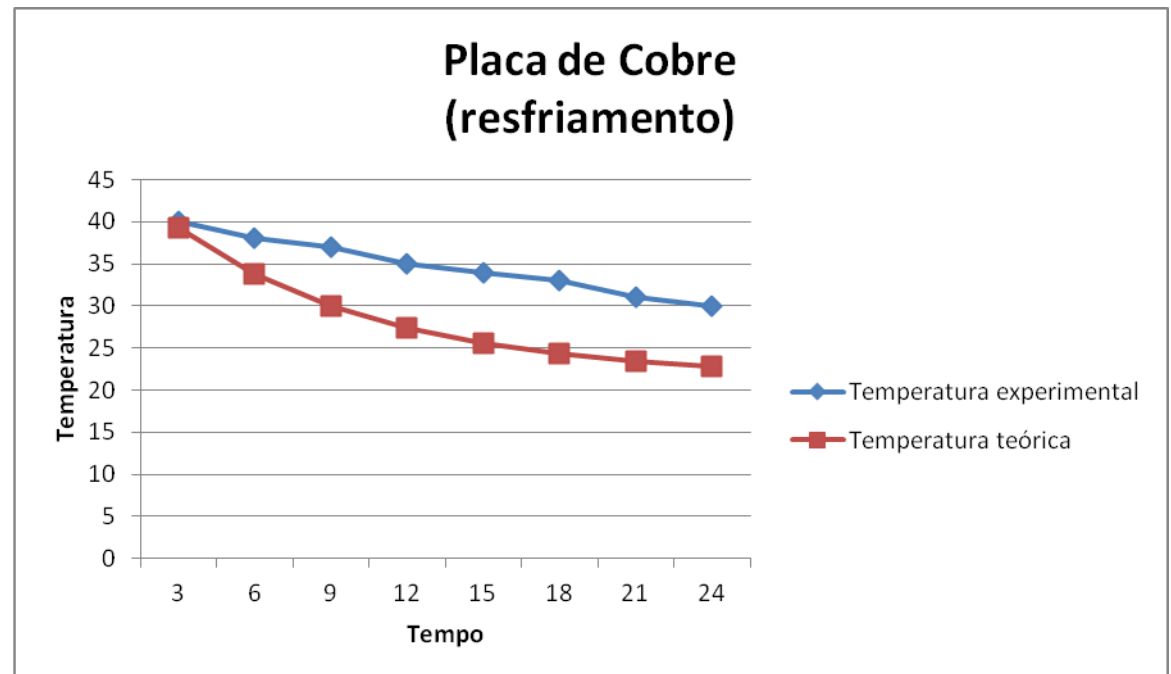
ETAPA DE RESFRIAMENTO





EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

ETAPA DE RESFRIAMENTO

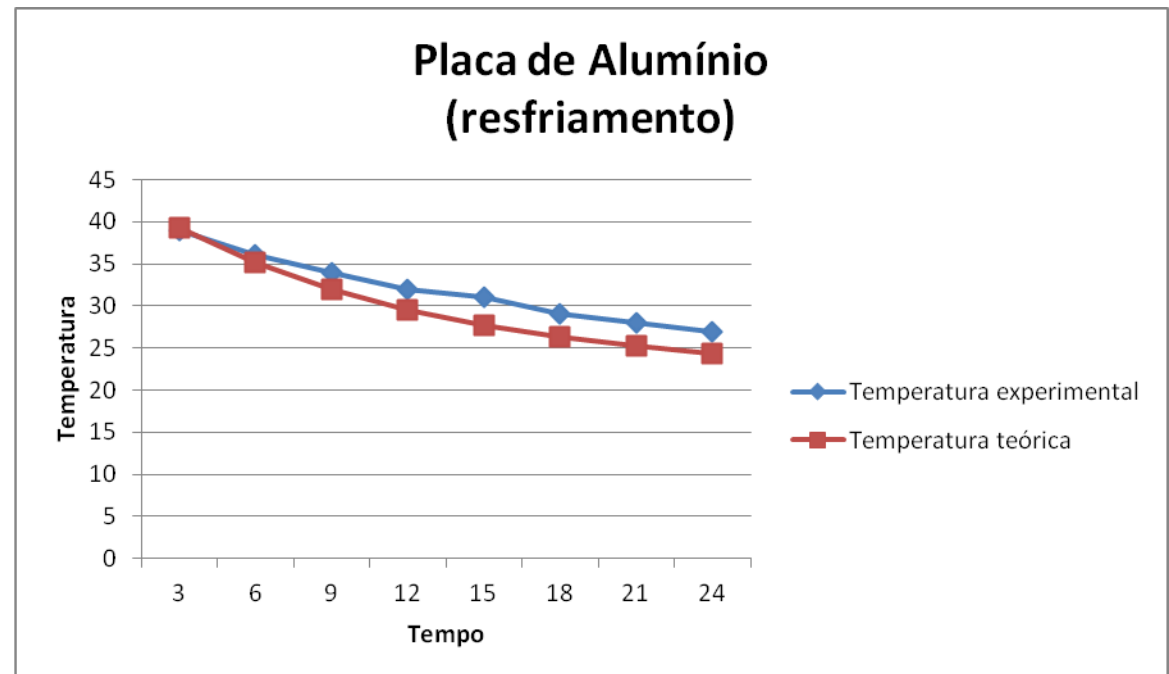




UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

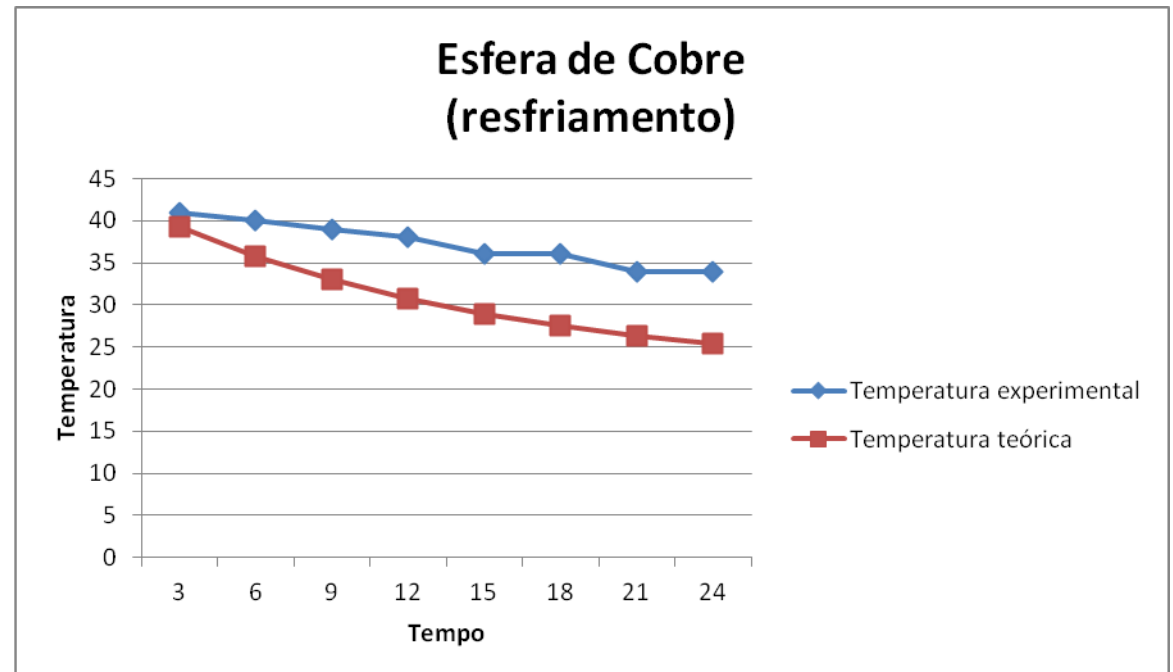
ETAPA DE RESFRIAMENTO





EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

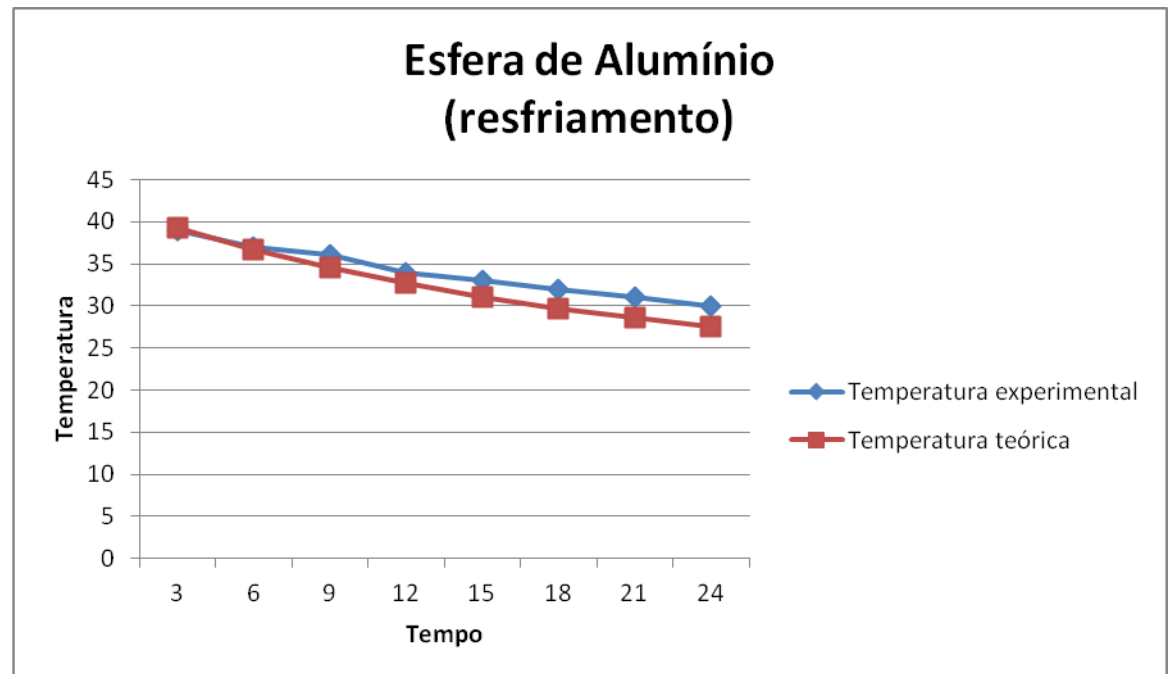
ETAPA DE RESFRIAMENTO





EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

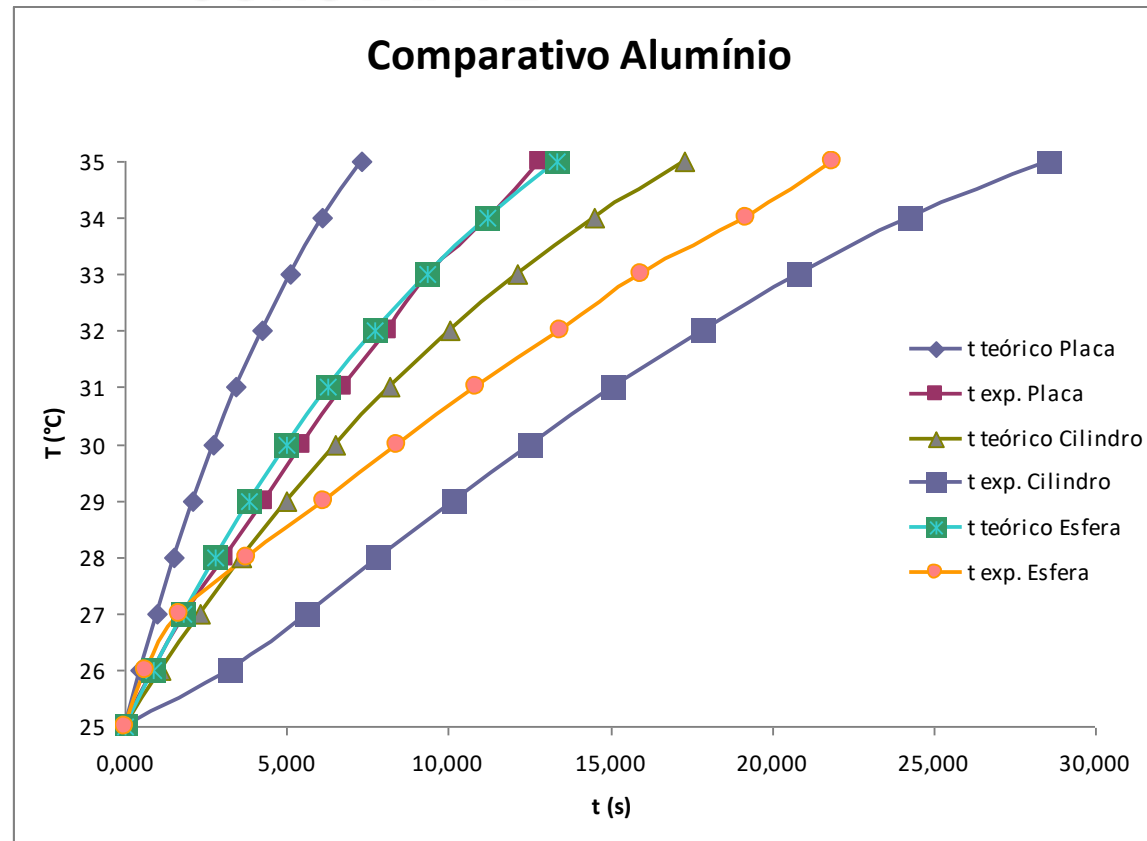
ETAPA DE RESFRIAMENTO





EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

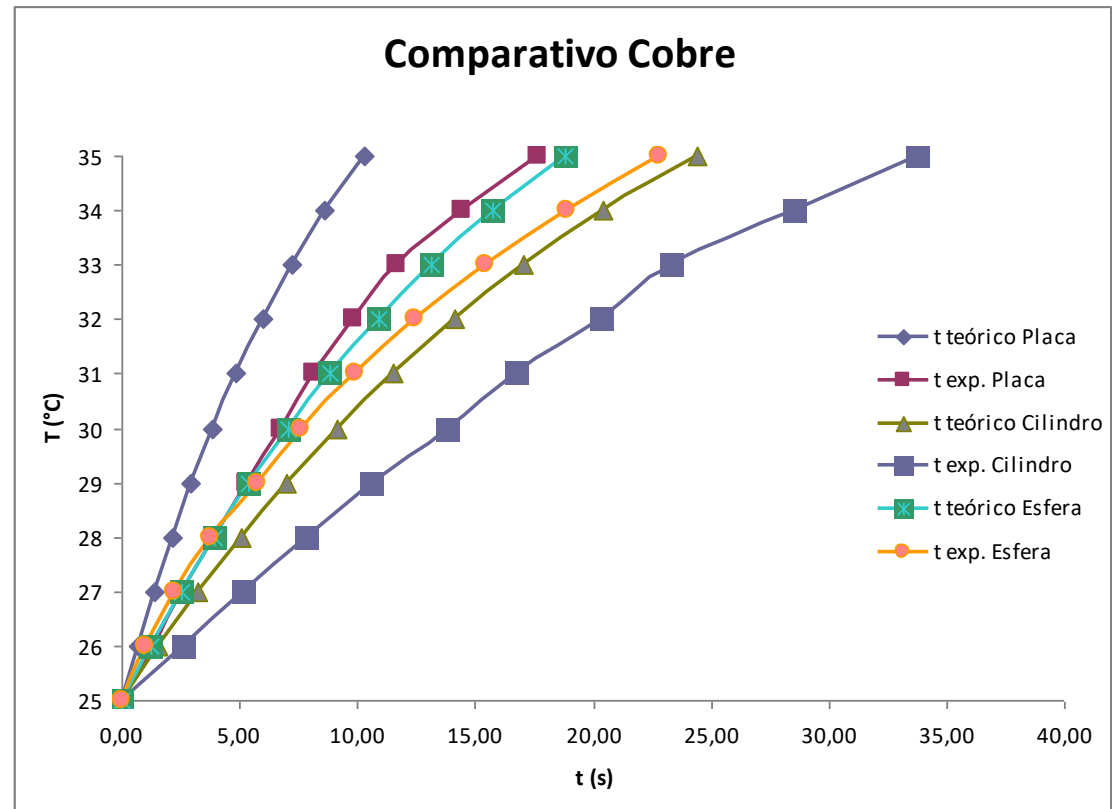
Comparações Aquecimento





EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

Comparações Aquecimento

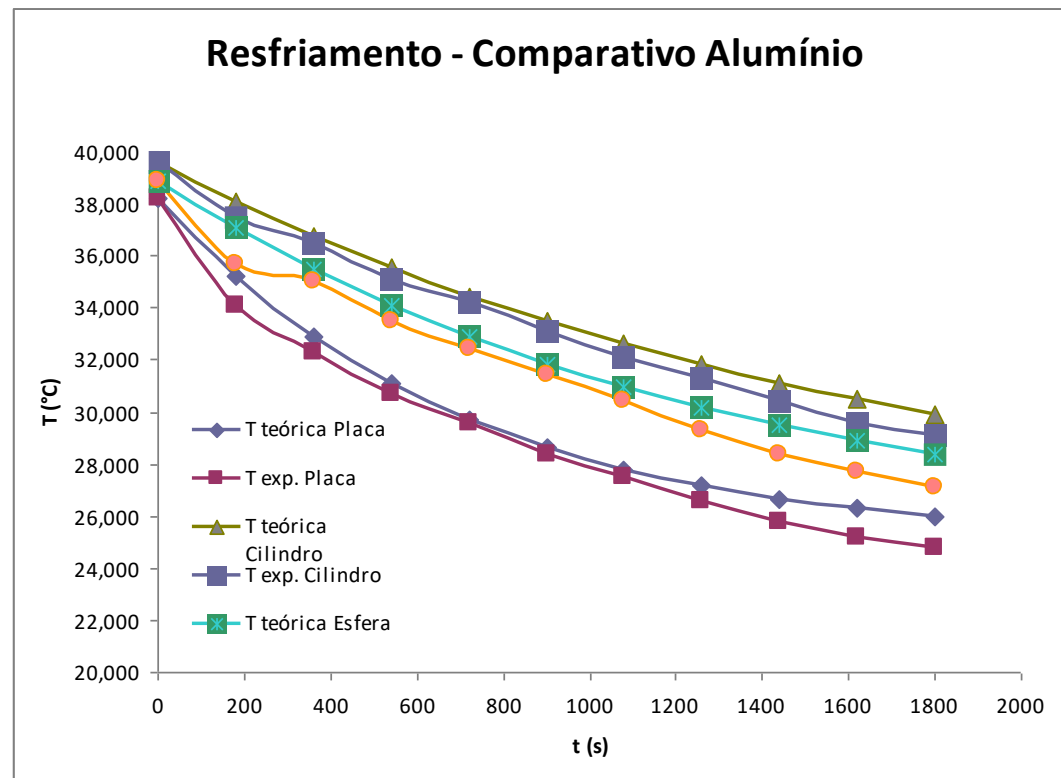




EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

Comparações

Resfriamento

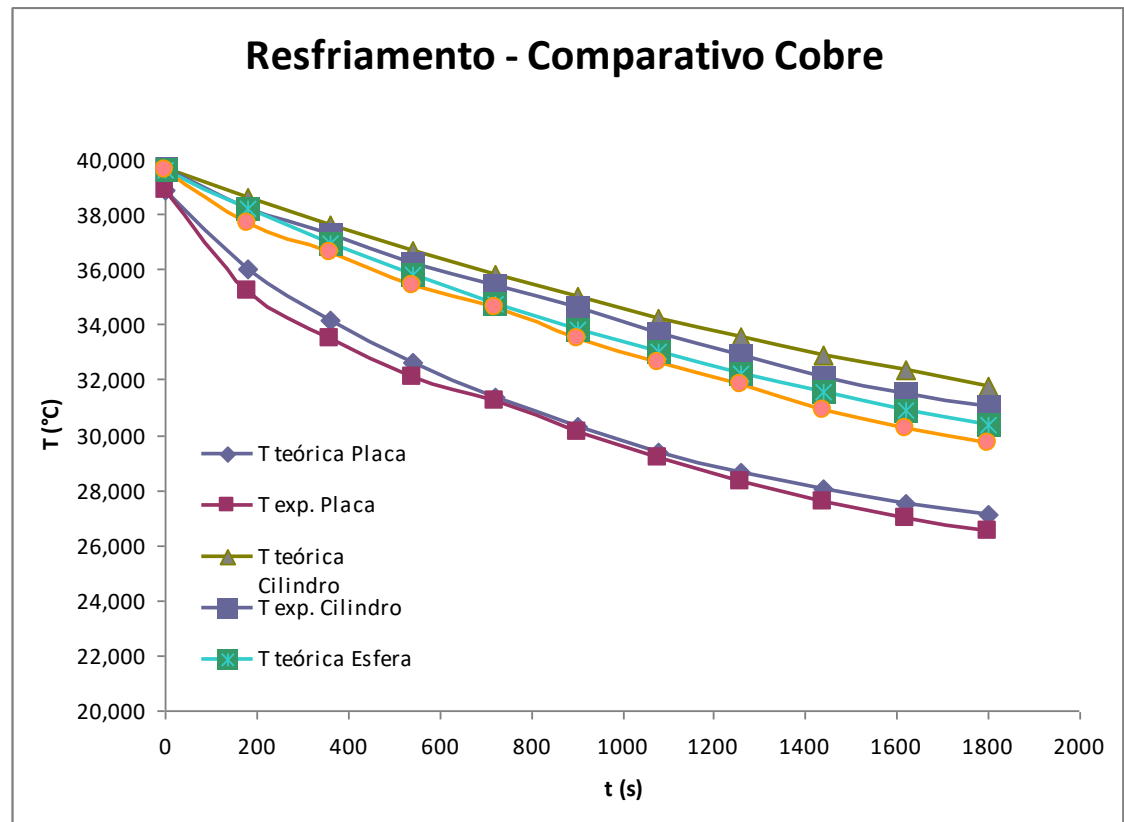




EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

Comparações

Resfriamento





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

EXPERIMENTO: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

CONCLUSÕES:

Influência da geometria no aquecimento e resfriamento

Influência do material no aquecimento e resfriamento

Qual a geometria e material que troca calor com maior eficiência? (mais rápido, por exemplo)