U N I V E R S I D A D E D E S Ã O P A U L O
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

LABORATÓRIO DE ENGENHARIA QUÍMICA 2

RELATÓRIO DO EXPERIMENTO DE AQUECIMENTO DE SÓLIDOS IMERSOS EM FLUIDOS A TEMPERATURA CONSTANTE

Sumário

1. Introdução 4
1.1. O método da capacitância Global 4
1.2. Coeficiente de tranferência de calor por convecção teórico 9
2. Materiais e Métodos 12
2.1. Materiais 12
2.2. Métodos 13
3. Objetivos 15
4. Resultados 15
4.1. Dimensões dos Sólidos 15
4.2. Dados Obtidos - Aquecimento 17
4.3. Cálculos – Aquecimento 18
4.4. Dados Obtidos - Resfriamento 20
4.5. Cálculos - Resfriamento 21
5. Discussões e Análises 23
6. Conclusão 24
Referências 24
ANEXO 1 25
ANEXO 2 27
ANEXO 3 30
ANEXO 4 32
ANEXO 5 34
ANEXO 6 35
ANEXO 7 38
ANEXO 8 42

Lista de Figuras

Figura 1 - Resfriamento de um material quente 5
Figura 2 -Esquema do balanço de energia global 6
Figura 3 – Placas 13
Figura 4 - Cilíndros 13
Figura 5 - Esferas 13
Figura 6 - Termopar 13
Figura 7 - Cuba 13
Figura 8 - Esquema do procedimento experimental de aquecimento 14
Figura 9 - Esquema experimental do procedimento de resfriamento 14

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dimensões das placas de Cu e de Al 15
Tabela 2 - Dimensões dos cilíndros de Cu e Al 16
Tabela 3 - Dimensões das esferas de Cu e Al 17
Tabela 4 - Propriedades Termofísicas da água saturada 17
Tabela 5 -Propriedades termofísicas da água em diferentes valores de temperatura 18
Tabela 6 - Propriedades termofísicas do Cu e do Al a 300 K 18
Tabela 7 - Propriedades Termofísicas do Ar 21

1. Introdução

A troca de calor acontece quando dois ou mais corpos com temperaturas diferentes são colocados em contato em um mesmo ambiente e, depois de algum tempo, alcançaram o equilíbrio térmico. Isso acontece porque o calor é um tipo de energia que transita entre os corpos, ocasionando esse movimento até que haja equilíbrio. A condução de calor transiente surge quando as condições de contorno de um sistema são mudadas. Assim, se a temperatura superficial de um sistema for alterada, a temperatura em cada ponto desse sistema também começará a mudar.

A convecção natural é um mecanismo no qual o movimento do fluido não é gerado por qualquer fonte externa, apenas por diferenças de densidade no fluido ocorrendo devido a gradientes de temperatura. A força condutora para a convecção natural é a flutuabilidade (relacionada ao empuxo), um resultado das diferenças nas densidades de fluidos.

1.1. O método da capacitância Global

Em determinadas situações, é necessário que se conheça o valor que relaciona a quantidade de calor transferida de uma superfície para um fluido ou vice-versa, o qual é denominado coeficiente de transferência de calor por convecção (h). Sabe-se que, na verdade, o h é uma função complexa que depende do escoamento do fluido, das propriedades físicas do meio do fluido e da geometria do sistema em questão.

No caso das propriedades físicas do fluido e de seu escoamento pode-se citar: viscosidade dinâmica do fluido, densidade do fluido, calor específico do fluido, condutividade térmica do fluido, coeficiente de expansão volumétrica, velocidade do fluido, aceleração da gravidade e a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido. Com relação à geometria, pode-se citar a dimensão característica, a qual domina o fenômeno da convecção.

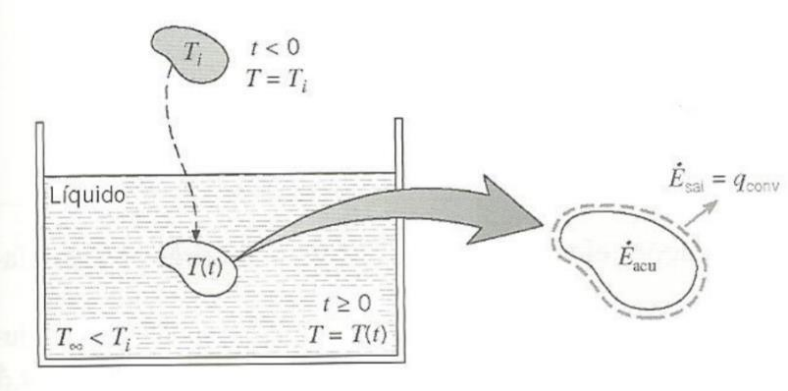
Dessa forma, não é possível encontrar seu valor em tabelas de referência, devido às inúmeras variáveis que influenciam seu cálculo. Assim, é mais conveniente e mais preciso utilizar um valor de coeficiente que tenha sido calculado experimentalmente a partir de correlações empíricas.

Para a determinação do h experimental nesse procedimento, será considerado o

Método da Capacitância Global, o qual elimina algumas variáveis da relação primordialmente conhecida e torna os cálculos menos extensos. O fundamento desse método é a hipótese de que a temperatura do sólido é uniforme no espaço durante qualquer instante do processo transiente, o que implica na eliminação dos gradientes de temperatura no interior do material que será analisado. Pela Lei de Fourier, um gradiente desprezível acarreta a existência de uma condutividade térmica, k, infinita, o que é impossível. No entanto, essa solução é aproximada se a resistência interna à transferência de calor por condução dentro do sólido é muito pequena comparada à resistência externa entre a superfície e o meio (convecção). Esta aproximação é mais exata quanto maior for à relação entre a área superficial e o volume, como em placas finas e fios.

Um problema recorrente da condução transiente envolve um sólido que passa por uma súbita mudança no seu ambiente térmico (*figura 1*). Na moldagem de um metal quente, por exemplo, que está inicialmente a uma temperatura Ti e que é temperado pela sua imersão em um líquido a uma temperatura mais baixa $T\infty < Ti$. A temperatura do sólido irá diminuir até que atinja $T\infty$ devido à transferência de calor por convecção na interface sólido-líquido. O método da Capacitância Global é o método mais simples e conveniente a ser usado nesse tipo de problema de resfriamento e aquecimento.

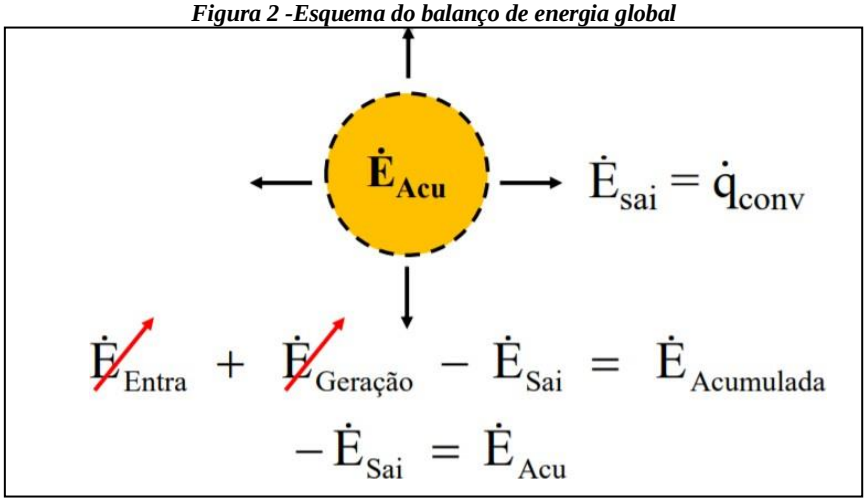
Figura 1 - Resfriamento de um material quente



Fonte: (INCROPERA et al., 2008),

Não obstante, ao desprezar a influência dos gradientes de temperatura no interior do sólido, o problema não pode mais ser analisado a partir da equação do calor. Assim, é realizado um balanço de energia global aplicado ao volume de controle no corpo submerso, como exemplificado na *figura 2*.

Figura 2 -Esquema do balanço de energia global



Fonte: (INCROPERA et al., 2008) adaptadao.

Como resultado dessa relação, tem-se que a taxa de perda ou ganho de calor de um sólido equivale À taxa de variação de energia interna. Desse modo:

$$-h.A_s.(T - T_\infty) = m.c_p.\frac{dT}{dt} \qquad eq.1$$

$$-h.A_s.(T - T_\infty) = \rho.V.c_p.\frac{dT}{dt} \qquad eq.2$$

Nais quais: A_s – área superficial do sólido (m^2); ρ – massa específica (Kg/m^3); V – volume (m^3); c_p – calor específico $(J/Kg.K)$; T – temperatura (K); T_∞ – temperatura do meio (K); t – tempo (s); h - coeficiente de transferência de calor por convecção $(W/m^2.K)$;

Por conveniência, define-se uma variação de temperatura (considerando T_∞ constante) como:

$$\theta = T - T_\infty \qquad eq.3$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{dT}{dt} \qquad eq.4$$

Desse modo, substituindo *eq.3* em *eq.2*, obtêm-se:

$$-h.A_s.(T - T_\infty) = \rho.V.c_p.\frac{d\theta}{dt} \qquad eq.5$$

Ao aplicar-se a integral em ambos os lados da equação e fazer-se a separação de variáveis, têm-se:

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T_s - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp\left[-\left(\frac{h.A_s}{\rho.V.c_p}\right).t\right] \qquad eq.6$$

Na qual: T_s = temperatura na superfície do sólido; T_i – temperatura inicial do sólido.

Ao rearranjar os temos da equação, a equação da determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção é obtida:

$$h_{exp} = -\left(\frac{\rho.V.c_p}{t.A_s}\right).ln\left(\frac{T_s - T_\infty}{T_i - T_\infty}\right) \qquad eq.7$$

Esta equação, se reorganizada, pode também ser utilizada para a determinação do tempo para que um sólido atinja uma determinada temperatura T:

$$t = -\left(\frac{\rho.V.c_p}{h.A_s}\right).ln\left(\frac{T_s - T_\infty}{T_i - T_\infty}\right) \qquad eq.8$$

Usando uma constante b, ainda é possível escrever a *eq.6* de uma outra forma:

$$b = \frac{h}{L_c.\rho.c_p} \qquad eq.9$$

$$\frac{T_s - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-b.t} \qquad eq.10$$

Na qual: L_c – Constante referente ao material, mas relacionada específicamente às suas dimensões:

$$L_c = \frac{V}{A_s} \qquad eq.11$$

A constante b ainda pode ser representada de uma forma alternativa:

$$\frac{h.t.A_s}{\rho.V.c_p} = \frac{h.t.}{L_c.\rho.c_p}.\left(\frac{k.L_c}{k.L_c}\right) = \frac{h.k.t.L_c}{k.\rho.c_p.{L_c}^2} = \frac{h.L_c.\alpha.t}{k.{L_c}^2} \qquad eq.12$$

Na qual: α – difusividade térmica do sólido (m^2/s); k – condutividade térmica do material $(W/m.K)$.

Pelo primeiro termo da *eq.12* encontra-se a constante de tempo térmica τ, a qual pode ser utilizada para calcular-se a temperatura do sólido em um tempo t.

$$\left(\frac{1}{h.A_s}\right).(\rho.V.c_p) = \tau \qquad eq.13$$

Assim, a *eq.6* pode ser rearranjada para:

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp\left[-t.\frac{1}{\tau}\right] \qquad eq.14$$

Para generalizar esta fórmula para vários objetos com geometrias diferentes, pode-se dar uso de dois número adimensionais:

- **Número de Fourier**

O número de Fourier (Fo) é um número adimensional usado para o cálculo de transferência de massa em problemas transientes. Ele caracteriza a condução de calor e é a razão entre a taxa condutiva de calor e a taxa de armazenamento de energia térmica em um sólido.

$$Fo = \frac{\alpha.t}{{L_c}^2} \qquad eq.15$$

- **Número de Biot**

O número de Biot (Bi) é um parâmetro adimensional que fornece um índice simples da razão entre o coeficiente da transferência convectiva de calor na superfície do sólido e a condutância específica do sólido, ou seja, a razão das resistências dentro e na

superfície de um corpo. Ele fornece uma medida da queda de temperatura no sólido em relação à diferença de temperaturas entre a superfície e o fluido.

$$Bi = \frac{h.L_c}{k_s} \qquad eq.16$$

Esses dois números adimensionais podem ser relacionados da seguinte maneira:

$$\frac{h.t.A_s}{\rho.V.c_p} = Bi.Fo \qquad eq.17$$

Desta forma, a *eq.14* pode ser escrita como:

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T_s - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp[-Bi.Fo] \qquad eq.14$$

Quando um substância tem um número de Biot menos que 0,1, ela pode ser caracterizada como termicamente fina e o calor pode ser considerado constante em todo o volume do material.

Portanto, para que o Método da Capacitância Global seja válido, é necessário que o número de Biot para as substãncias seja menor do que 0,1 ($Bi < 0{,}1$), o que indica que o erro associado ao uso deste método é pequeno.

1.2. Coeficiente de tranferência de calor por convecção teórico

Este coeficiente pode ser encontrado através do cálculo de alguns númeors adimensionais, os quais são determinados com base nas propriedades físicas dos fluidos, nas geometrias dos sólidos e em suas temperaturas.

- **Número de Grashof**

O número de Grashof (Gr) é uma razão de forças de flutuação e forças viscosas. Ele pode ser entendido como a razão do empuxo ascendente do fluido aquecido e a fricção interna retardando a descendência. Em fluidos muito aderentes e viscosos, o movimento do fluido é restrito, juntamente com a convecção natural. A equação usada para que se

possa encontrar este número adimensional é:

$$Gr = \frac{g.\beta.(T_\infty - T_s).d^3}{v^2} \qquad eq.15$$

Na qual: g – aceleração da gravidade (m^2/s); β – coeficiente de expansão térmica $(1/K)$; d – dimensão característica (m); $v = \mu/\rho$ – viscosidade cinemática do fluido (m^2/s).

O número de Grashof depende da geometria do material estudado, desta forma, nas três principais geometrias estudadas aqui (considerando a simplificação do uso de apenas a dimensão onde há maior tranferência de calor para efeitos de cálculo), esse número adimensional pode ser encontrado por meio das respectivas dimensões características:

- Placa: Altura;
- Cilíndro: Altura;
- Esfera: Diâmetro.

- **Número de Prandtl**

O número de Prandtl (Pr) é a razão da difusividade do momento (viscosidade cinemática) e difusividade térmica de um fluido; ele expressa a relação entre a difusão de quantidade de movimento e a difusão de quantidade de calor dentro do próprio fluido, sendo uma medida da eficiência destas transferências nas camadas limites hidrodinâmica e térmica. Este número controla a espessura relativa das camadas limite de momento e térmica. Se o número de Prandtl é muito pequeno, o calor difunde-se muito facilmente comparado à velocidade.

$$Pr = \frac{\mu.c_p}{k} \qquad eq.16$$

Na qual: μ – viscosidade dinâmica do fluido $(Kg/m.s)$.

- **Número de Rayleigh**

O número de Rayleigh é definido como o produto do número de Grashof, que descreve a relação entre flutuabilidade e viscosidade dentro de um fluido, e o número de Prandtl, que descreve a relação entre a difusividade dinâmica e a difusividade térmica.

$$Ra = Gr.Pr \qquad eq.17$$

- **Número de Nusselt**

O número de Nusselt é um número adimensional muito utilizado para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção. Ele é uma função do número de Reynolds e do número de Prandtl e pode ser escrito pela razão entre a transferência de calor por convecção pela transferência de calor por condução.

Este número adimensional pode ser definido também a partir do número de Rayleigh, e depende da geometria do material estudado. Dessa forma, para as principais geometrias estudadas aqui, os respectivas equações para que o número de Nusselt (equações gerais para uso geral em engenharia) possa ser encontrado são:

  - Placa

$$Nu = \left\{0{,}825 + \frac{0{,}387.Ra^{1/6}}{[1 + (0{,}492/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2 \qquad eq.18$$

  - Cilíndro

$$Nu = \left\{0{,}6 + \frac{0{,}387.Ra^{1/6}}{[1 + (0{,}559/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2 \qquad eq.19$$

  - Esfera

$$Nu = 2 + \frac{0{,}589.Ra^{1/4}}{[1 + (0{,}469/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \qquad eq.20$$

Por fim, a equação para encontrar-se o número de Nusselt pode-se ser escrita também em função do coeficiente de convecção teórico, da dimensão característica (já definidas na discussão do número de Grashof) e da condutividade térmica do fluido.

$$Nu = \frac{h.d}{k} \qquad eq.21$$

Rearranjando esta equação é possível obter-se uma equação que determina o coeficiente de conveção teórico a partir do número de Nusselt, da dimensão característica do material e da condutividade térmica do fluido.

$$h_{exp} = \frac{Nu.k}{d} \qquad eq.22$$

OBS.: Toda a introdução foi baseada no conteúdo presente em Incropera et al. (2008).

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

- Esfera de Alumínio;
- Cilindro de Alumínio;
- Placa de Alumínio;
- Esfera de Cobre;
- Cilindro de Cobre;
- Placa de Cobre;
- Placa de Cobre;
- Termopar portátil;
- Cronômetro (Celular);
- Termômetros;
- Cuba com água quente.

Figura 3 – Placas

Fonte: o autor.

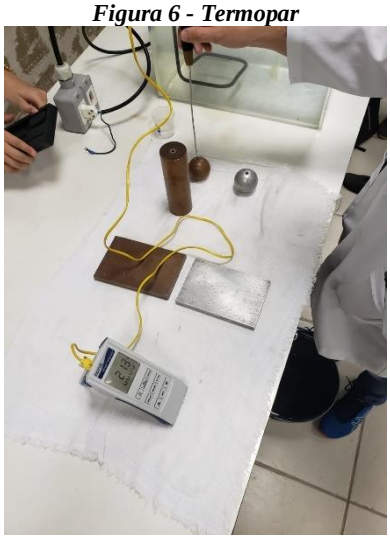
Figura 4 - Cilíndros

Fonte: o autor.

Figura 5 - Esferas

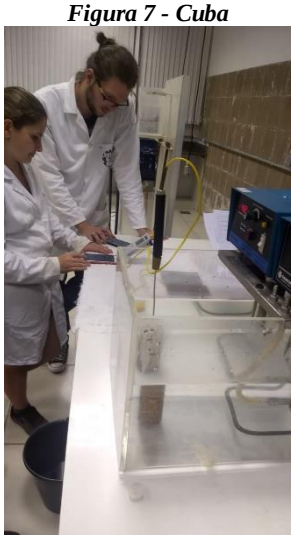
Fonte: o autor.

Figura 6 - Termopar



Fonte: o autor.

Figura 7 - Cuba



Fonte: o autor.

2.2. Métodos

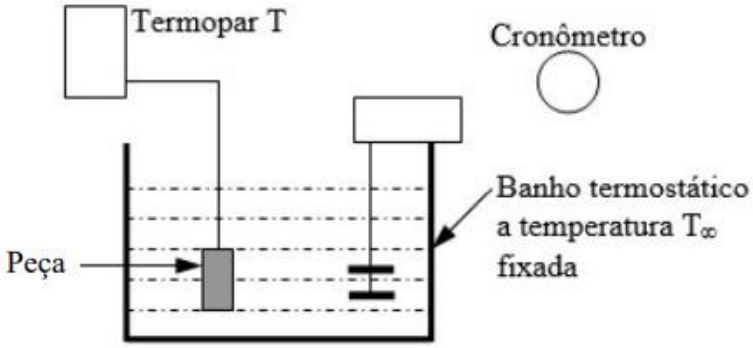
Primeiramente, verificou-se a temperatura da água da cuba (T∞) e a temperatura de cada um dos sólidos (Ti) e esses valores foram fixados para a realização dos cálculos posteriormente.

Em seguida, iniciou-se o experimento de aquecimento, colocando nas peças (esfera, cilindro e placa) um termopar portátil que seria responsável por averiguar a temperatura no interior das peças. Cada peça, individualmente, foi submergida no banho de água quente, e quando a mesma atingiu a temperatura adequada (23°C para placa e cilíndro e 25° para esfera), o cronômetro foi disparado e a cada 2°C de elevação anotava-se o intervalo de tempo até a temperatura atingir 39°C. O esquema do experimento pode

ser verificado na *figura 8*.

Após essa análise, a peça foi removida da cuba de água quente e foi colocada em um banho de água fria (temperatura ambiente), para posteriormente ser realizada uma segunda medição dessa mesma peça.

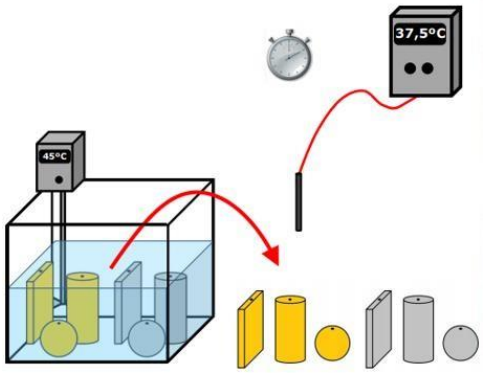
Figura 8 - Esquema do procedimento experimental de aquecimento



Fonte: Material disponibilizado pelo professor.

Concluindo-se todas as medições de aquecimento das peças, iniciou-se o experimento de resfriamento. Primeiro a tempertaura ambiente (T∞ = 23°C) foi medida e fixada para, posteriormente, ser usada nos cálculos. Todas as peças foram colocadas na cuba de água quente e após alguns minutos as mesmas foram retiradas. Instalou-se novamente o termopar nas peças e quando foi atingida a temperatura de 41°C, disparou-se o cronômetro. As temperaturas foram anotadas a cada 30 segundos, durante um tempo total de 5 minutos. O esquema do experimento pode ser observado na *figura 9*.

Figura 9 - Esquema experimental do procedimento de resfriamento



Fonte: o autor.

3. Objetivos

Este experimento tem por objetivo a determinação da temperatura no centro geométrico de diferentes formas sólidas (placa, cilíndro e esfera), considerando o Método da Capacitância Global para os cálculos. A partir dos dados obtidos será verificada também, a comparação com a análise por parâmetros concentrados, com objetivo de validar a hipótese de parâmetros concentrados. Dessa forma, pretende-se determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção natural (h) tanto pelos métodos experimentais, como também pelo método teórico, advindo da teoria presente na literatura, já abordada.

4. Resultados

4.1. Dimensões dos Sólidos

Para que todos os cálculos pudessem ser realizados, primeiramente as dimensões dos sólidos foram medidas e suas respectivas áreas superficiais, volumes e comprimento característico foram encontrados quando necessário.

- **Placas**

Para as placas, as dimensões foram medidas e as respectívas áreas superficiais (*eq.23*), volumes (*eq.24*) e comprimentos característicos (*eq.11*) foram encontrados para cada material utilizado. Os dados obtidos estão representados na *tabela 1*.

Tabela 1 - Dimensões das placas de Cu e de Al

	a(m)	b(m)	c(m)	As(m²)	V(m³)	Lc (m)
Placa de Cu	0,099	0,15	0,011	0,035178	0,00016335	0,004643527
Placa de Al	0,099	0,15	0,011	0,035178	0,00016335	0,004643527

Fonte: o autor.

$$A_s = 2.a.b + 2.b.c + 2.a.c \qquad eq.23$$

$$V = a.b.c \qquad eq.24$$

OBS.: É importante notar que a dimensão característica que será usada para o cálculo do coeficiente de convecção teórico é a altura (b), conforme já mostrado na teoria.

- **Cilíndros**

Para os cilíndros, as dimensões foram medidas e as respectívas áreas superficiais (*eq.25*), volumes (*eq.26*) e comprimentos característicos (*eq.11*) foram encontrados para cada material utilizado. Os dados obtidos estão representados na *tabela 2*.

Tabela 2 - Dimensões dos cilíndros de Cu e Al

	D(m)	L(m)	As(m²)	V(m³)	Lc (m)
Cilindro de Cu	0,048	0,15	0,026238582	0,000271434	0,010344828
Cilindro de Al	0,048	0,15	0,026238582	0,000271434	0,010344828

Fonte: o autor.

$$A_s = 2.\pi.\left(\frac{D}{2}\right).L + 2.\pi.\left(\frac{D}{2}\right)^2 \qquad eq.25$$

$$V = \pi.\left(\frac{D}{2}\right)^2.L \qquad eq.26$$

OBS.: É importante notar que a dimensão característica que será usada para o cálculo do coeficiente de convecção teórico é a altura (L), conforme já mostrado na teoria.

- **Esferas**

Para as esferas, as dimensões foram medidas e as respectívas áreas superficiais (*eq.27*), volumes (*eq.28*) e comprimentos característicos (*eq.11*) foram encontrados para cada material utilizado. Os dados obtidos estão representados na *tabela 3*.

Tabela 3 - Dimensões das esferas de Cu e Al

	D(m)	As(m²)	V(m³)	Lc (m)
Esfera de Cu	0,048	0,007238229	5,79058E-05	0,008
Esfera de Al	0,048	0,007238229	5,79058E-05	0,008

Fonte: o autor.

$$A_s = 4.\pi.\left(\frac{D}{2}\right)^2 \qquad eq.27$$

$$V = \frac{4}{3}.\pi.\left(\frac{D}{2}\right)^3 \qquad eq.28$$

OBS.: É importante notar que a dimensão característica que será usada para o cálculo do coeficiente de convecção teórico é o diâmetro (D), conforme já mostrado na teoria.

4.2. Dados Obtidos - Aquecimento

As temperaturas medidas no pré experimento para os cilíndrios e placas foram Ti=23°C (296 K), para as esferas foram de Ti=25°C (298 K), e para o banho T∞ = 42°C (315 K). Após a realização do procedimento de aquecimento em duplicata para cada um dos materiais, os dados obtidos conforme o método aplicado no experimento estão presentes nas no *ANEXO 1*.

De acordo com Incropera et al. (2008), para que se obtenham as propriedades termo físicas do meio (água) em cada uma das tempertauras medidas, será necessário o cálculo de uma temperatura média (*eq.29*) entre a superfície do material e o meio para que as interpolações das propriedades presentes na *tabela 4* sejam possíveis, e assim, os cálculos dos coeficiente de convecção tenham uma maior precisão.

Tabela 4 - Propriedades Termofísicas da água saturada

Valores para interpolação						
T (K)	**β (1/K)**	**μ (kg/m.s)**	**p(kg/m³)**	**v(m²/s)**	**k(W/m.K)**	**Cp(J/kg.K)**
305	3,21E-04	7,69E-04	995,0248756	7,73E-07	6,20E-01	4178
310	3,62E-04	6,95E-04	993,0486594	7,00E-07	6,28E-01	4178
315	4,00E-04	6,31E-04	991,0802775	6,37E-07	6,34E-01	4179

Obs:
p=1/ve

Fonte: (INCROPERA et al., 2008).

$$T_m = \frac{T_s + T_\infty}{2} \qquad eq.29$$

Desse modo, as interpolações feitas para as propriedades em cada T_s entre 23°C (296 K) até 39°C (312 K) com intervalos de 2°C (2 K) estão mostradas na *tabela 5*.

Tabela 5 -Propriedades termofísicas da água em diferentes valores de temperatura

Tm (K) = (Ts+T∞)/2	β (1/K)	μ (kg/m.s)	p(kg/m³)	ν(m²/s)	k(W/m.K)	Cp(J/kg.K)
305,5	3,25E-04	7,62E-04	994,827254	7,66E-07	6,21E-01	4178
306,5	3,33E-04	7,47E-04	994,4320108	7,51E-07	6,22E-01	4178
307,5	3,41E-04	7,32E-04	994,0367675	7,36E-07	6,24E-01	4178
308,5	3,50E-04	7,17E-04	993,6415243	7,22E-07	6,26E-01	4178
309,5	3,58E-04	7,02E-04	993,246281	7,07E-07	6,27E-01	4178
310,5	3,66E-04	6,89E-04	992,8518212	6,94E-07	6,29E-01	4178,1
311,5	3,73E-04	6,76E-04	992,4581448	6,81E-07	6,30E-01	4178,3
312,5	3,81E-04	6,63E-04	992,0644684	6,68E-07	6,31E-01	4178,5
313,5	3,89E-04	6,50E-04	991,6707921	6,56E-07	6,32E-01	4178,7

Fonte: o autor.

Por fim, algumas propriedades físicas dos materiais (consideradas constantes para a variação de tempertaura para efeitos de cálculo) serão necessárias para que se realizem os cálculos. Estas propriedades estão presentes na *tabela 6*.

Tabela 6 - Propriedades termofísicas do Cu e do Al a 300 K

	ps(kg/m³)	Cp(J/kg.K)	ks(W/m.K)
Cobre	8933	385	401
Alumínio	2702	903	237

Fonte: (INCROPERA et al., 2008).

4.3. Cálculos – Aquecimento

Os cálculos para o procedimento de aquecimento foram realizados de forma a encontrar os coeficientes de convecção natural experimentais e teóricos associados a cada um dos materias e formas geométricas. Com esses valores, os tempos experimentais e teóricos para que se atinja um determinada temperatura serão encontrados e, então, será feita, também, uma comparação entre entre os coeficientes de convecção experimentais e teóricos.

- **Cálculos para coeficientes de convecção experimentais**

Os cálculos que devem ser realizados para que se possa encontrar os valores dos coeficientes de convecção experimentais devem ser realizados a partir dos dados coletados no experimento, presentes no *ANEXO 1* e na *tabela 6*, além dos comprimentos característicos de cada material presentes nas *tabelas 1, 2 e 3* e da temperaturas medidas no pré experimento para os cilíndrios e placas que foram Ti=23°C (296 K), e para as esferas que foi de Ti=25°C (298 K), e, por fim, para o banho T∞ = 42°C (315 K). Com esses dados, a *eq.7* será utilizida para que se possa encontrar os valores dos coeficientes de convecção experimentais para cada um dos materiais e em cada uma das temperaturas, para que, assim, seja encontrado um valor médio experimental deste coeficiente para cada um dos materias utilizados. Os resultados dos cálculos estão presentes no *ANEXO 2*.

Além disso, também foram calculados os números de Biot através da *eq.16* a fim de analisar a coerência do uso do método da capacitância Global. Os valores dos números de Biot estão presentas também no *ANEXO 2*.

- **Cálculos para coeficientes de convecção teóricos**

Já para os cálculos dos coeficientes de conveção teóricos de cada um dos materiais, um sequência maior de cálculos deve ser realizada. Nestes cálculos, os dados que serão utilizados estão presentes no *ANEXO 1*, nas *tabelas 1, 2, 3, 5 e 6*.

Primeiramente é importante entender que os cálculos serão realizados com base na utilização dos números adimensionais já definidos no primeiro capítulo. A sequência dos cálculos para cada um dos materiais será feita da seguinte maneira:

1. Primeiro será feito o cálculo do número de Grashof (*eq.15*), a partir dos dados já obtidos anteriormente e utilizando a dimensão característica já definida para cada um dos materiais;
2. Em seguida, será realizado o cálculo do número de Prandtl (*eq.16*) a partir dos dados já encontrados por interpolação para cada um das temperaturas (*tabela 5*).
3. Após a obtenção dos números de Prandtl e de Grashof, será, então, calculado o número de Rayleigh por sua multiplicação, como mostrado na *eq.17*.
4. No quarto passo será calculado o número de Nusselt. É importante notar que o

cálculo deste número adimensional será realizado a partir das *equações 18, 29 e 20* para as placas, os cilíndros e as esferas respectivamente.

5. Então, será encontrado o coeficiente de convecção teórico através da *eq. 22*.
6. Por fim, será feita uma média com todos os valores encontrados para cada uma das temperaturas medidas para que se possa encontrar o coeficiente de convecção teórico médio. Além disso também serão feitos os desvios relativos entre os coeficientes experimentais e teóricos.

Todos os resultados encontrados pelos cálculos estão presentes no *ANEXO 2* para cada cada um dos materiais.

- **Gráficos**

Enfim, para que os gráficos de Temperatura x tempo experimental e temperatura x tempo teórico possam ser encontrados, foram feitos os cálculos dos tempos teóricos através da *eq.8* com uso dos dados presentes no *ANEXO 1,* nas *tabelas 1, 2, 3, 5 e 6* e a partir dos coeficientes de convecção teóricos encontrados. Os dados econtrados estão presentes no *ANEXO 3*. Os Gráficos estão representados no *ANEXO 4*.

4.4. Dados Obtidos - Resfriamento

As temperaturas medidas pré experimento para todos os materiais foram Ti=41°C (314 K), e para o meio T∞ = 23°C (296 K). Após a realização do procedimento de resfriamento para cada um dos materiais, os dados obtidos conforme o método aplicado no experimento estão presentes nas no *ANEXO 5*.

De acordo com Incropera et al. (2008), para que se obtenham as propriedades termo físicas do meio (ar atmosférico) em cada uma das tempertauras medidas, será necessário o cálculo de uma temperatura média (*eq.29*) entre a superfície do material e o meio para que as interpolações das propriedades presentes na *tabela 7* sejam possíveis, e assim, os cálculos dos coeficiente de convecção tenham uma maior precisão.

Tabela 7 - Propriedades Termofísicas do Ar

Valores para interpolação						
T (K)	β (1/K)	μ (kg/m.s)	p(kg/m³)	ν(m²/s)	k(W/m.K)	Cp(J/kg.K)
300	3,33E-03	1,8460E-05	1,1614	1,59E-05	2,63E-02	1007
350	2,86E-03	2,0820E-05	0,995	2,09E-05	3,00E-02	1009

Obs: β=1/Tm

Fonte: (INCROPERA et al., 2008),

Desse modo, as interpolações feitas para as propriedades em cada T_s encontrada dentro dos 5 min totais medidos estão mostradas no *ANEXO 6.*

Por fim, algumas propriedades físicas dos materiais (consideradas constantes para a variação de tempertaura para efeitos de cálculo) serão necessárias para que se realizem os cálculos. Estas propriedades estão presentes na *tabela 6*.

4.5. Cálculos - Resfriamento

Os cálculos para o procedimento de resfriamento foram realizados de forma a encontrar os coeficientes de convecção natural experimentais e teóricos associados a cada um dos materias e formas geométricas. Com esses valores, os tempos experimentais e teóricos para que se atinja um determinada temperatura serão encontrados e, então, será feita, também, uma comparação entre entre os coeficientes de convecção experimentais e teóricos.

- **Cálculos para coeficientes de convecção experimentais**

Os cálculos que devem ser realizados para que se possa encontrar os valores dos coeficientes de convecção experimentais devem ser realizados a partir dos dados coletados no experimento, presentes no *ANEXO 5* e na *tabela 6*, além dos comprimentos característicos de cada material presentes nas *tabelas 1, 2 e 3* e das temperaturas medidas no pré experimento as quais foram Ti=41°C (314 K) para todos os materiais, e T∞ = 23°C (296 K) para o meio (ar). Com esses dados, a *eq.7* será utilizida para que se possa encontrar os valores dos coeficientes de convecção experimentais para cada um dos materiais e em cada uma das temperaturas, para que, assim, seja encontrado um valor médio experimental deste coeficiente para cada um dos materias utilizados. Os resultados dos cálculos estão presentes no *ANEXO 7*.

Além disso, também foram calculados os números de Biot através da *eq.16* a fim de analisar a coerência do uso do método da capacitância Global. Os valores dos números de Biot estão presentas também no *ANEXO 7*.

- **Cálculos para coeficientes de convecção teóricos**

Já para os cálculos dos coeficientes de conveção teóricos de cada um dos materiais, um sequência maior de cálculos deve ser realizada. Nestes cálculos, os dados que serão utilizados estão presentes nos *ANEXOS 5 e 6 e* nas *tabelas 1, 2, 3 e 6.*

Primeiramente é importante entender que os cálculos serão realizados com base na utilização dos números adimensionais já definidos no primeiro capítulo. A sequência dos cálculos para cada um dos materiais será feita da seguinte maneira:

1. Primeiro será feito o cálculo do número de Grashof (*eq.15*), a partir dos dados já obtidos anteriormente e utilizando a dimensão característica já definida para cada um dos materiais;
2. Em seguida, será realizado o cálculo do número de Prandtl (*eq.16*) a partir dos dados já encontrados por interpolação para cada um das temperaturas (*tabela 5*).
3. Após a obtenção dos números de Prandtl e de Grashof, será, então, calculado o número de Rayleigh por sua multiplicação, como mostrado na *eq.17.*
4. No quarto passo será calculado o número de Nusselt. É importante notar que o cálculo deste número adimensional será realizado a partir das *equações 18, 19 e 20* para as placas, os cilíndros e as esferas respectivamente.
5. Então, será encontrado o coeficiente de convecção teórico através da *eq. 22*.
6. Por fim, será feita uma média com todos os valores encontrados para cada uma das temperaturas medidas para que se possa encontrar o coeficiente de convecção teórico médio. Além disso também serão feitos os desvios relativos entre os coeficientes experimentais e teóricos.

Todos os resultados encontrados pelos cálculos estão presentes no *ANEXO 7* para cada cada um dos materiais.

- **Gráficos**

Enfim, os gráficos de Temperatura experimental x tempo serão encontrados a partir dos dados obtidos em laboratório que estão presentes no *ANEXO 5.* Os gráficos com tempo teórico não têm sentido em relação à análise física do experimento, desta forma não serão encontrados.

Os gráficos de Temperatura experimental x tempo estão presentes no *ANEXO 8.*

5. Discussões e Análises

- **Discussões para o aquecimento**

Primeiramente é importante ressaltar que todos os números de Biot (Bi) encontrados foram inferiores a 0,1, o que valida o método de capacitância global.

A partir dos dados apresentados, a análise dos valores obtidos de condutividade térmica é reafirmado, os sólidos de alumínio se aquecem mais rapidamente do que os de cobre já que todos os "h" do cobre são superiores aos do alumínio, ou seja, demoram mais para aquecer. Além do material, o formato do sólido também interfere no tempo com que cada um demora para aquecer, a ordem crescente de velocidade de aquecimento é placa, cilindro e esfera o que pode ser explicado pela maior superfície de contato (área), por exemplo a placa é a que possui maior superfície de contato, por isso é a que se aquece com mais rapidez.

Os desvios apresentam valores altos, que podem ser ocasionados por vários fatores, como por exemplo a idade e uso constante dos equipamentos, manuseio incorreto, condições adversas no laboratório, como a temperatura não controlada. Além disso as medições podem ter erros visuais, como um possível atraso ou adiantamento na contagem do cronômetro.

- **Discussões para o resfriamento**

Deve-se, primeiramente, levar em consideração que todos os números de Biot (Bi) em todos os experimentos de resfriamento foram menores que 0,1, validando, assim, o método da capacitância global.

Pode-se notar, de acordo com os dados apresentados, que os sólidos de alumínio alcançaram temperaturas menores que os sólidos de cobre em um mesmo intervalo de tempo, ou seja, eles resfriaram mais rapidamente. Além disso, o formato do corpo também influencia na velocidade com a qual os sólidos se resfriam. Nota-se que quanto maior a área superficial do sólido, maior a velocidade com a qual ele troca calor com o meio em que se encontra, dessa fica evidente que houveram alguns erros durante o experimento, uma vez que a ordem crescente de velocidade de resfriamento foi placa, esfera e cilíndro, mas deveria ter sido placa, cilíndro e esfera.

Os desvios apresentados são bem altos, isso pode ocorrer pela imprecisão na leitura da temperatura em cada tempo t, ou pela possível presença de água no furo presente no material, que torna errada a leitura da temperatura. Além disso, também pode-se considerar as condições adversas no laboratório, como variação da temperatura ambiente.

6. Conclusão

Pôde-se concluir, com base nos resultados obtidos, que tanto a forma do sólido quanto o tipo de material do qual ele é feito influenciam nas transferências de calor desse sólido, tanto no seu aquecimento quanto no seu resfriamento.

Também pôde-se concluir que os sólidos feitos de alumínio trocam calor com o meio mais rapidamente.

Referências

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6. ed. Rio de Janiero: Ltc, 2008.

ANEXO 1

AQUECIMENTO EM ÁGUA

Medidas	Cilindro de Cobre				Medidas	Cilindro de Alumínio			
	T°C	t1 (s)	t2(s)	tm(s)		T°C	t1 (s)	t2(s)	tm(s)
0	23	0	0	0	0	23	0	0	0
1	25	7,32	7,32	7,32	1	25	6,33	6,01	6,17
2	27	16,04	15,37	15,705	2	27	12,79	12,25	12,52
3	29	26,91	26,18	26,545	3	29	21,04	19,72	20,38
4	31	41,61	40,29	40,95	4	31	30,93	29,62	30,275
5	33	61,38	59,19	60,285	5	33	45,27	41,69	43,48
6	35	86,16	86,77	86,465	6	35	62	56,49	59,245
7	37	126,5	119,58	123,04	7	37	82	82,13	82,065
8	39	202,83	201,08	201,955	8	39	141,47	129,53	135,5
Medidas	Placa de Cobre				Medidas	Placa de Alumínio			
	T°C	t1 (s)	t2(s)	tm(s)		T°C	t1 (s)	t2(s)	tm(s)
0	23	0	0	0	0	23	0	0	0
1	25	4,58	7,52	6,05	1	25	3,86	7,56	5,71
2	27	7,86	10,1	8,98	2	27	6,97	10,16	8,565
3	29	12,06	14,21	13,135	3	29	9,96	13,58	11,77
4	31	17,97	18,2	18,085	4	31	13,95	17,09	15,52
5	33	25,45	25,62	25,535	5	33	19,39	22,44	20,915
6	35	35,39	35,74	35,565	6	35	26,19	29,93	28,06
7	37	51,77	53,29	52,53	7	37	38,21	41,82	40,015
8	39	86,81	87,65	87,23	8	39	61,24	67,45	64,345
Medidas	Esfera de Cobre				Medidas	Esfera de Alumínio			
	T°C	t1 (s)	t2(s)	tm(s)		T°C	t1 (s)	t2(s)	tm(s)
0	25	0	0	0	0	25	0	0	0
1	27	3,86	5,29	4,575	1	27	1,64	2,9	2,27
2	29	10,01	12,71	11,36	2	29	4,1	9,97	7,035
3	31	18,76	20,22	19,49	3	31	14,85	17,51	16,18

4	**33**	31,49	29,52	30,505	**4**	**33**	25,53	27,53	26,53
5	**35**	49,47	45,73	47,6	**5**	**35**	39,01	39,84	39,425
6	**37**	82,77	72,65	77,71	**6**	**37**	63,28	60,65	61,965
7	**39**	177,39	140,1	158,745	**7**	**39**	125,5	120,13	122,815

Fonte: o autor.

ANEXO 2

Dados dos materiais para aquecimento em água

Dados para o aquecimento da placa de alumínio em água

		Placa de alúminio												
Medidas	**Ts (°C)**	**Ts (K)**	**t1(s)**	**t2(s)**	**tm(s)**	**Tm(K)**	**hexp (W/m².K)**	**Bi**	**Gr**	**Pr**	**Ra**	**Nu**	**hteórico (W/m².K)**	**DR (%)**
0	**23**	**296**	0	0	0	305,5	----	----	----	----	----	----	----	----
1	**25**	**298**	3,86	7,56	5,71	306,5	220,6937	0,0043	3,32E+08	5,0131	1,6660E+09	175,1605	726,7995	229%
2	**27**	**300**	6,97	10,16	8,565	307,5	312,6947	0,0061	3,13E+08	4,9011	1,5317E+09	170,3653	708,7195	127%
3	**29**	**302**	9,96	13,58	11,77	308,5	365,2957	0,0072	2,89E+08	4,7897	1,3830E+09	164,7651	687,1802	88%
4	**31**	**304**	13,95	17,09	15,52	309,5	398,9829	0,0078	2,61E+08	4,6789	1,2191E+09	158,1571	661,3075	66%
5	**33**	**306**	19,39	22,44	20,915	310,5	404,7701	0,0079	2,27E+08	4,5769	1,0370E+09	150,1643	629,2884	55%
6	**35**	**308**	26,19	29,93	28,06	311,5	403,1754	0,0079	1,87E+08	4,4835	8,3691E+08	140,2930	589,0437	46%
7	**37**	**310**	38,21	41,82	40,015	312,5	377,9896	0,0074	1,41E+08	4,3904	6,2025E+08	127,6794	537,1047	42%
8	**39**	**312**	61,24	67,45	64,345	313,5	325,0104	0,0064	8,98E+07	4,2977	3,8612E+08	110,1667	464,3159	43%
Média	-	-	-	-	-	-	351,0766	0,0069	229813115,6	4,6414	1,0850E+09	149,5939222	625,4699	78%

Dados para o aquecimento da placa de cobre em água

		Placa de cobre												
Medidas	**Ts (°C)**	**Ts (K)**	**t1(s)**	**t2(s)**	**tm(s)**	**Tm(K)**	**hexp (W/m².K)**	**Bi**	**Gr**	**Pr**	**Ra**	**Nu**	**hteórico (W/m².K)**	**DR (%)**
0	**23**	**296**	0	0	0	305,5	----	----	----	----	----	----	----	----
1	**25**	**298**	4,58	7,52	6,05	306,5	293,5997	0,0034	332326114,9	5,0131	1,6660E+09	175,1605	726,7995	148%
2	**27**	**300**	7,86	10,1	8,98	307,5	420,3941	0,0049	312528363,9	4,9011	1,5317E+09	170,3653	708,7195	69%
3	**29**	**302**	12,06	14,21	13,135	308,5	461,3982	0,0053	288751763,9	4,7897	1,3830E+09	164,7651	687,1802	49%
4	**31**	**304**	17,97	18,2	18,085	309,5	482,6279	0,0056	260545922	4,6789	1,2191E+09	158,1571	661,3075	37%
5	**33**	**306**	25,45	25,62	25,535	310,5	467,3211	0,0054	226571075,2	4,5769	1,0370E+09	150,1643	629,2884	35%
6	**35**	**308**	35,39	35,74	35,565	311,5	448,3775	0,0052	186664320,6	4,4835	8,3691E+08	140,2930	589,0437	31%
7	**37**	**310**	51,77	53,29	52,53	312,5	405,8638	0,0047	141273741,4	4,3904	6,2025E+08	127,6794	537,1047	32%
8	**39**	**312**	86,81	87,65	87,23	313,5	337,9334	0,0039	89843622,9	4,2977	3,8612E+08	110,1667	464,3159	37%
Média	-	-	-	-	-	-	414,6895	0,0048	229813115,6	4,6414	1,0850E+09	149,5939	625,4699	51%

Dados para o aquecimento do cilindro de alumínio em água

		Cilindro de alumínio												
Medidas	Ts (°C)	Ts (K)	t1(s)	t2(s)	tm(s)	Tm(K)	hexp (W/m².K)	Bi	Gr	Pr	Ra	Nu	hteórico (W/m².K)	DR (%)
0	23	296	0	0	0	305,5	----	----	----	----	----	----	----	----
1	25	298	6,33	6,01	6,17	306,5	455,0049	0,0199	332326114,9	5,0131	1,6660E+09	167,7813	696,1807	53%
2	27	300	12,79	12,25	12,52	307,5	476,5614	0,0208	312528363,9	4,9011	1,5317E+09	163,0961	678,4798	42%
3	29	302	21,04	19,72	20,38	308,5	469,9937	0,0205	288751763,9	4,7897	1,3830E+09	157,6289	657,4178	40%
4	31	304	30,93	29,62	30,275	309,5	455,6560	0,0199	2,61E+08	4,6789	1,2191E+09	151,1834	632,1484	39%
5	33	306	45,27	41,69	43,48	310,5	433,7625	0,0189	226571075,2	4,5769	1,0370E+09	143,3955	600,9228	39%
6	35	308	62	56,49	59,245	311,5	425,4076	0,0186	186664320,6	4,4835	8,3691E+08	133,7880	561,7311	32%
7	37	310	82	82,13	82,065	312,5	410,6010	0,0179	141273741,4	4,3904	6,2025E+08	121,5257	511,2181	25%
8	39	312	141,47	129,53	135,5	313,5	343,8333	0,0150	89843622,9	4,2977	3,8612E+08	104,5280	440,5506	28%
Média	-	-	-	-	-	-	433,8526	0,0189	229813115,6	4,6414	1,0850E+09	142,8659	597,3311	38%

Dados para o aquecimento do cilindro de Cobre em água

		Cilindro de cobre												
Medidas	Ts (°C)	Ts (K)	t1(s)	t2(s)	tm(s)	Tm(K)	hexp (W/m².K)	Bi	Gr	Pr	Ra	Nu	hteórico (W/m².K)	DR (%)
0	23	296	0	0	0	305,5	----	----	----	----	----	----	----	----
1	25	298	7,32	7,32	7,32	306,5	540,5989	0,0139	332326114,9	5,0131	1,6660E+09	167,7813	696,1807	29%
2	27	300	16,04	15,37	15,705	307,5	535,5133	0,0138	312528363,9	4,9011	1,5317E+09	163,0961	678,4798	27%
3	29	302	26,91	26,18	26,545	308,5	508,6259	0,0131	288751763,9	4,7897	1,3830E+09	157,6289	657,4178	29%
4	31	304	41,61	40,29	40,95	309,5	474,8455	0,0122	260545922,0	4,6789	1,2191E+09	151,1834	632,1484	33%
5	33	306	61,38	59,19	60,285	310,5	440,9784	0,0114	226571075,2	4,5769	1,0370E+09	143,3955	600,9228	36%
6	35	308	86,16	86,77	86,465	311,5	410,8673	0,0106	186664320,6	4,4835	8,3691E+08	133,7880	561,7311	37%
7	37	310	126,5	119,58	123,04	312,5	386,0260	0,0100	141273741,4	4,3904	6,2025E+08	121,5257	511,2181	32%
8	39	312	202,83	201,08	201,955	313,5	325,1754	0,0084	89843622,9	4,2977	3,8612E+08	104,5280	440,5506	35%
Média	-	-	-	-	-	-	452,8288	0,0117	229813115,6	4,6414	1,0850E+09	142,8659	597,3311	32%

Dados para o aquecimento da Esfera de alúminio em água

		Esfera de alumínio												
Medidas	Ts (°C)	Ts (K)	t1(s)	t2(s)	tm(s)	Tm(K)	hexp (W/m².K)	Bi	Gr	Pr	Ra	Nu	hteórico (W/m².K)	DR (%)
0	25	298	0	0	0	306,5	----	----	----	----	----	----	----	----

1	**27**	**300**	1,64	2,9	2,27	307,5	1076,2513	0,0363	9608525,4	5,0131	4,8168E+07	46,2201	599,3201	44%
2	**29**	**302**	4,1	9,97	7,035	308,5	744,3229	0,0251	8875472,2	4,9011	4,3500E+07	45,0563	585,7318	21%
3	**31**	**304**	14,85	17,51	16,18	309,5	525,1595	0,0177	8006153,5	4,7897	3,8347E+07	43,6697	569,1615	8%
4	**33**	**306**	25,53	27,53	26,53	310,5	467,9240	0,0158	6985283,5	4,6789	3,2684E+07	41,9876	548,6374	17%
5	**35**	**308**	39,01	39,84	39,425	311,5	439,3022	0,0148	5774440,8	4,5769	2,6429E+07	39,8743	522,1874	19%
6	**37**	**310**	63,28	60,65	61,965	312,5	385,4947	0,0130	4369011,8	4,4835	1,9588E+07	37,1023	486,8128	26%
7	**39**	**312**	125,5	120,13	122,815	313,5	275,6838	0,0093	2777554,8	4,3904	1,2195E+07	33,1441	435,7068	58%
Média	-	-	-	-	-	-	489,2673	0,0165	5799555,2	4,1042	2,7614E+07	35,8818	468,4447	4%

Dados para o aquecimento da Esfera de cobre em água

		Esfera de Cobre												
Medidas	**Ts (°C)**	**Ts (K)**	**t1(s)**	**t2(s)**	**tm(s)**	**Tm(K)**	**hexp (W/m².K)**	**Bi**	**Gr**	**Pr**	**Ra**	**Nu**	**hteórico (W/m².K)**	**DR (%)**
0	**25**	**298**	0	0	0	306,5	----	----	----	----	----	----	----	----
1	**27**	**300**	4,16	4	4,08	307,5	844,0426	0,0168	9608525,4	5,0131	4,8168E+07	46,2201	599,3201	29%
2	**29**	**302**	9,59	9,44	9,515	308,5	775,7140	0,0155	8875472,2	4,9011	4,3500E+07	45,0563	585,7318	24%
3	**31**	**304**	15,83	14,09	14,96	309,5	800,6140	0,0160	8006153,5	4,7897	3,8347E+07	43,6697	569,1615	29%
4	**33**	**306**	22,41	22,26	22,335	310,5	783,4505	0,0156	6985283,5	4,6789	3,2684E+07	41,9876	548,6374	30%
5	**35**	**308**	30,39	29,74	30,065	311,5	812,0053	0,0162	5774440,8	4,5769	2,6429E+07	39,8743	522,1874	36%
6	**37**	**310**	42,34	41,77	42,055	312,5	800,6305	0,0160	4369011,8	4,4835	1,9588E+07	37,1023	486,8128	39%
7	**39**	**312**	58,99	55,97	57,48	313,5	830,2921	0,0166	2777554,8	4,3904	1,2195E+07	33,1441	435,7068	48%
Média	-	-	-	-	-	-	705,8436	0,0141	5799555,2	4,1042	2,7614E+07	35,8818	468,4447	34%

Fonte: o autor.

ANEXO 3

Dados para plotar os gráficos de Temperatura experimental *versus* Tempo experimental e Temperatura experimental *versus* Tempo Teórico

Placa de alumínio		Placa de cobre		Temperatura
texp(s)	T teórico(s)	tm(s)	T teórico(s)	T°C
0	0	0	0	23
5,71	1,734	6,05	2,444	25
8,565	3,779	8,98	5,327	27
11,77	6,257	13,135	8,819	29
15,52	9,364	18,085	13,199	31
20,915	13,453	25,535	18,963	33
28,06	19,206	35,565	27,072	35
40,015	28,161	52,53	39,694	37
64,345	45,040	87,23	63,487	39

Dados para plotar os gráficos de Temperatura experimental *versus* Tempo experimental e Temperatura experimental *versus* Tempo Teórico

Cilindro de alumínio		Cilindro de cobre		Temperatura
texp(s)	T teórico(s)	tm(s)	T teórico(s)	T°C
0	0	0	0	23
6,17	4,033	7,32	5,684	25
12,52	8,794	15,705	12,396	27
20,38	14,570	26,545	20,537	29
30,275	21,822	40,95	30,760	31
43,48	31,385	60,285	44,239	33
59,245	44,867	86,465	63,243	35
82,065	65,913	123,04	92,909	37

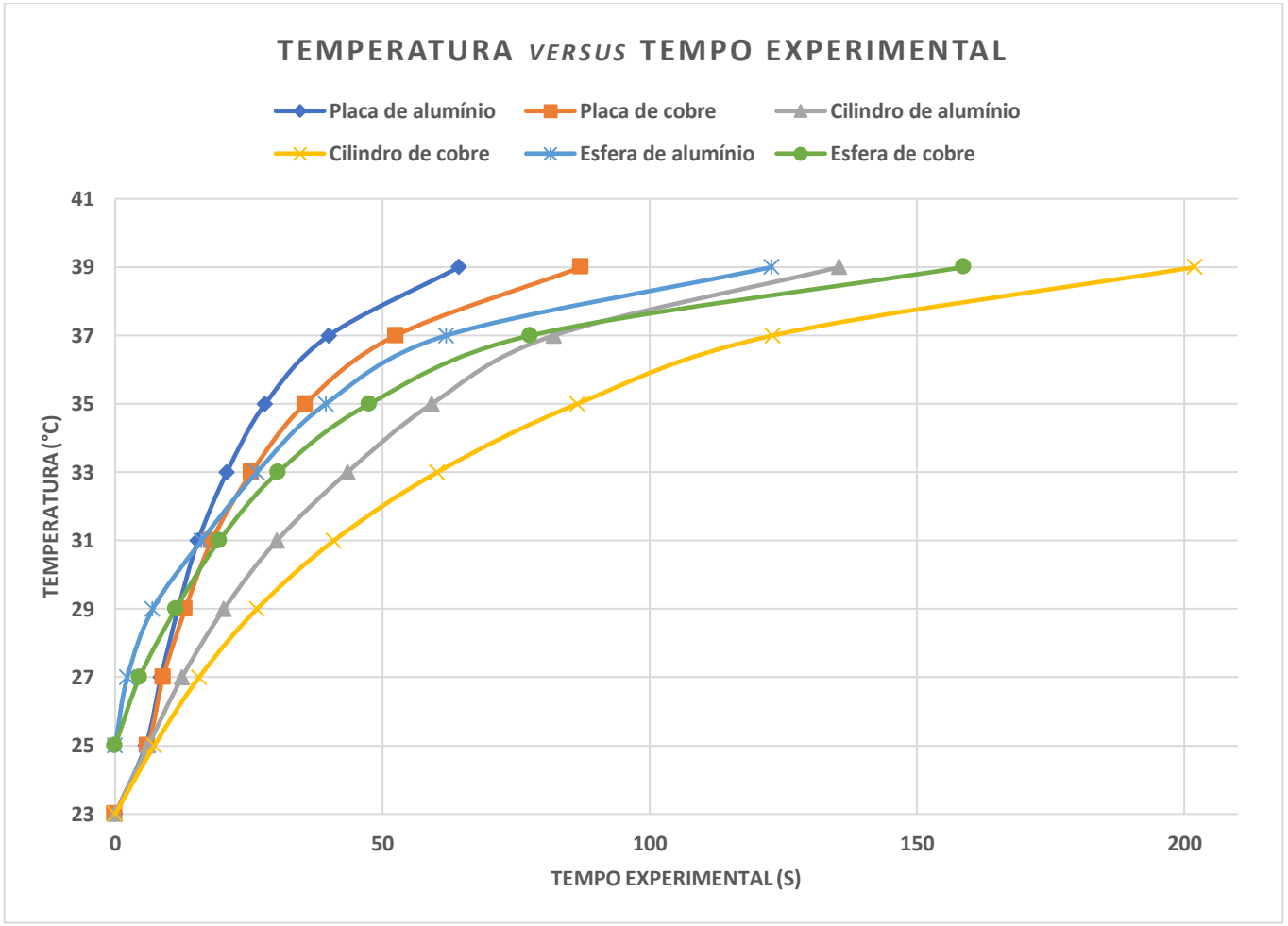
135,5	105,753	201,955	149,065	39

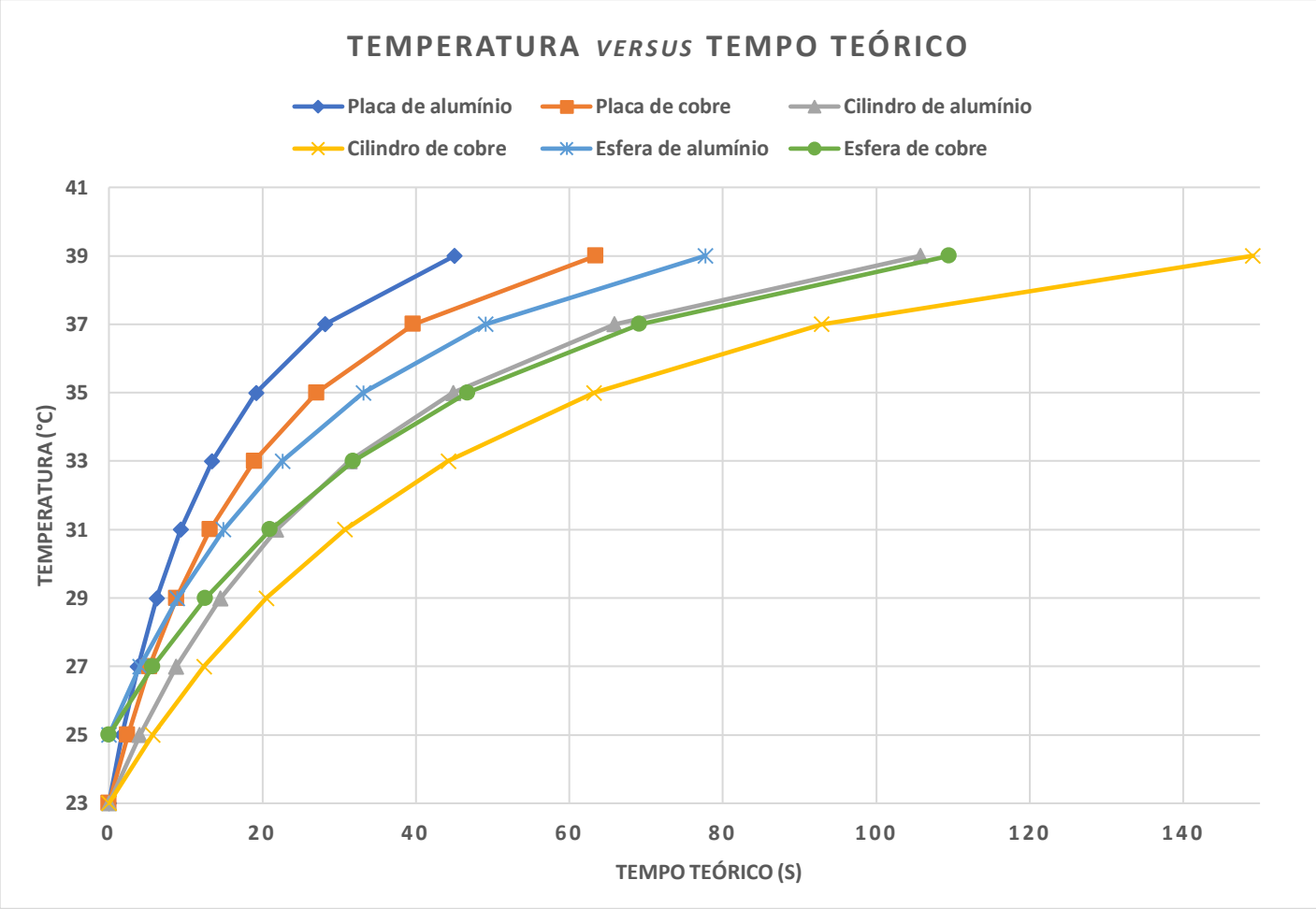
Dados para plotar os gráficos de Temperatura experimental *versus* Tempo experimental e Temperatura experimental *versus* Tempo Teórico

Esfera de alumínio		Esfera de cobre		Temperatura
texp(s)	T teórico(s)	tm(s)	T teórico(s)	T°C
0	0	0	0	25
2,27	4,076	4,575	5,746	27
7,035	8,940	11,36	12,601	29
16,18	14,929	19,49	21,044	31
26,53	22,627	30,505	31,894	33
39,425	33,167	47,6	46,751	35
61,965	49,069	77,71	69,165	37
122,815	77,708	158,745	109,535	39

Fonte: o autor.

ANEXO 4


TEMPERATURA VERSUS TEMPO EXPERIMENTAL
Placa de alumínio
Placa de cobre
Cilindro de alumínio
Cilindro de cobre
Esfera de alumínio
Esfera de cobre
41
39
37
35
33
31
29
27
25
23
TEMPERATURA (°C)
0
50
100
150
200
TEMPO EXPERIMENTAL (S)



Fonte: o autor.

ANEXO 5

Resfriamento no ar atmosférico						
t(s)/T(°C)	Placa de Cu	Cilíndro de Cu	Esfera de Cu	Placa de Alumínio	Cilíndro de Alumínio	Esfera de Alumínio
30	40,5	40,4	40,4	40,5	39,9	39,5
60	39,9	40,1	39,9	39,6	39,3	38,7
90	39,2	39,9	39,5	38,9	39	38,1
120	38,7	39,5	39,1	38,4	38,6	37,8
150	38,2	39,4	38,8	37,8	38,5	37,5
180	37,7	39,2	38,6	37,5	38,3	37,2
210	37,5	39,1	38,3	37	38	36,8
240	37,2	38,9	38	36,5	37,7	36,5
270	36,8	38,8	37,7	36,2	37,6	36,1
300	36,4	38,6	37,5	35,7	37,4	35,8

Fonte: o autor.

ANEXO 6

	Propriedades termofísicas do ar em diferentes valores de temperatura						
	Tm (k) = (Ts+T∞)/2	**β (1/K)**	**μ (kg/m.s)**	**p(kg/m³)**	**v(m²/s)**	**k(W/m.K)**	**Cp(J/kg.K)**
Placa de alumínio	304,75	3,2814E-03	1,87E-05	1,1456	1,64E-05	2,67E-02	1007,19
	304,3	3,2862E-03	1,87E-05	1,1471	1,63E-05	2,66E-02	1007,17
	303,95	3,2900E-03	1,86E-05	1,1483	1,63E-05	2,66E-02	1007,16
	303,7	3,2927E-03	1,86E-05	1,1491	1,63E-05	2,66E-02	1007,15
	303,4	3,2960E-03	1,86E-05	1,1501	1,62E-05	2,66E-02	1007,14
	303,25	3,2976E-03	1,86E-05	1,1506	1,62E-05	2,65E-02	1007,13
	303	3,3003E-03	1,86E-05	1,1514	1,62E-05	2,65E-02	1007,12
	302,75	3,3031E-03	1,86E-05	1,1522	1,62E-05	2,65E-02	1007,11
	302,6	3,3047E-03	1,86E-05	1,1527	1,62E-05	2,65E-02	1007,10
	302,35	3,3074E-03	1,86E-05	1,1536	1,61E-05	2,65E-02	1007,09
Placa de cobre	304,75	3,2814E-03	1,87E-05	1,1456	1,64E-05	2,67E-02	1007,19
	304,45	3,2846E-03	1,87E-05	1,1466	1,63E-05	2,66E-02	1007,18
	304,1	3,2884E-03	1,87E-05	1,1478	1,63E-05	2,66E-02	1007,16
	303,85	3,2911E-03	1,86E-05	1,1486	1,63E-05	2,66E-02	1007,15
	303,6	3,2938E-03	1,86E-05	1,1494	1,63E-05	2,66E-02	1007,14
	303,35	3,2965E-03	1,86E-05	1,1503	1,62E-05	2,65E-02	1007,13
	303,25	3,2976E-03	1,86E-05	1,1506	1,62E-05	2,65E-02	1007,13
	303,1	3,2992E-03	1,86E-05	1,1511	1,62E-05	2,65E-02	1007,12
	302,9	3,3014E-03	1,86E-05	1,1517	1,62E-05	2,65E-02	1007,12
	302,7	3,3036E-03	1,86E-05	1,1524	1,62E-05	2,65E-02	1007,11
Cilindro de Alumínio	304,45	3,2846E-03	1,87E-05	1,1466	1,63E-05	2,66E-02	1007,18
	304,15	3,2879E-03	1,87E-05	1,1476	1,63E-05	2,66E-02	1007,17
	304	3,2895E-03	1,86E-05	1,1481	1,63E-05	2,66E-02	1007,16
	303,8	3,2916E-03	1,86E-05	1,1488	1,63E-05	2,66E-02	1007,15
	303,75	3,2922E-03	1,86E-05	1,1489	1,63E-05	2,66E-02	1007,15
	303,65	3,2933E-03	1,86E-05	1,1493	1,63E-05	2,66E-02	1007,15
	303,5	3,2949E-03	1,86E-05	1,1498	1,62E-05	2,66E-02	1007,14
	303,35	3,2965E-03	1,86E-05	1,1503	1,62E-05	2,65E-02	1007,13

	303,3	3,2971E-03	1,86E-05	1,1504	1,62E-05	2,65E-02	1007,13
	303,2	3,2982E-03	1,86E-05	1,1508	1,62E-05	2,65E-02	1007,13
Cilindro de Cobre	304,7	3,2819E-03	1,87E-05	1,1458	1,64E-05	2,66E-02	1007,19
	304,55	3,2835E-03	1,87E-05	1,1463	1,63E-05	2,66E-02	1007,18
	304,45	3,2846E-03	1,87E-05	1,1466	1,63E-05	2,66E-02	1007,18
	304,25	3,2868E-03	1,87E-05	1,1473	1,63E-05	2,66E-02	1007,17
	304,2	3,2873E-03	1,87E-05	1,1474	1,63E-05	2,66E-02	1007,17
	304,1	3,2884E-03	1,87E-05	1,1478	1,63E-05	2,66E-02	1007,16
	304,05	3,2889E-03	1,87E-05	1,1479	1,63E-05	2,66E-02	1007,16
	303,95	3,2900E-03	1,86E-05	1,1483	1,63E-05	2,66E-02	1007,16
	303,9	3,2906E-03	1,86E-05	1,1484	1,63E-05	2,66E-02	1007,16
	303,8	3,2916E-03	1,86E-05	1,1488	1,63E-05	2,66E-02	1007,15
Esfera de Alumínio	304,25	3,2868E-03	1,87E-05	1,1473	1,63E-05	2,66E-02	1007,17
	303,85	3,2911E-03	1,86E-05	1,1486	1,63E-05	2,66E-02	1007,15
	303,55	3,2944E-03	1,86E-05	1,1496	1,62E-05	2,66E-02	1007,14
	303,4	3,2960E-03	1,86E-05	1,1501	1,62E-05	2,66E-02	1007,14
	303,25	3,2976E-03	1,86E-05	1,1506	1,62E-05	2,65E-02	1007,13
	303,1	3,2992E-03	1,86E-05	1,1511	1,62E-05	2,65E-02	1007,12
	302,9	3,3014E-03	1,86E-05	1,1517	1,62E-05	2,65E-02	1007,12
	302,75	3,3031E-03	1,86E-05	1,1522	1,62E-05	2,65E-02	1007,11
	302,55	3,3052E-03	1,86E-05	1,1529	1,61E-05	2,65E-02	1007,10
	302,4	3,3069E-03	1,86E-05	1,1534	1,61E-05	2,65E-02	1007,10
Esfera de Cobre	304,7	3,2819E-03	1,87E-05	1,1458	1,64E-05	2,66E-02	1007,19
	304,45	3,2846E-03	1,87E-05	1,1466	1,63E-05	2,66E-02	1007,18
	304,25	3,2868E-03	1,87E-05	1,1473	1,63E-05	2,66E-02	1007,17
	304,05	3,2889E-03	1,87E-05	1,1479	1,63E-05	2,66E-02	1007,16
	303,9	3,2906E-03	1,86E-05	1,1484	1,63E-05	2,66E-02	1007,16
	303,8	3,2916E-03	1,86E-05	1,1488	1,63E-05	2,66E-02	1007,15
	303,65	3,2933E-03	1,86E-05	1,1493	1,63E-05	2,66E-02	1007,15
	303,5	3,2949E-03	1,86E-05	1,1498	1,62E-05	2,66E-02	1007,14
	303,35	3,2965E-03	1,86E-05	1,1503	1,62E-05	2,65E-02	1007,13

303,25	3,2976E-03	1,86E-05	1,1506	1,62E-05	2,65E-02	1007,13

Fonte: o autor.

ANEXO 7

Dados para o resfriamento da placa de alumínio em ar										
Placa de alúminio										
tempo (s)	**Ts (°C)**	**Tm(K)**	**hexp (W/m².K)**	**Bi**	**Gr**	**Pr**	**Ra**	**Nu**	**hteórico (W/m².K)**	**DR (%)**
0	**41**	305	----	----	----	----	----	----	----	----
30	**40,5**	304,75	10,6390	0,0002	7096657,5	0,7061	5,0109E+06	2,5665E+01	4,5602	57%
60	**39,6**	304,3	15,2893	0,0003	6779088,6	0,7062	4,7871E+06	2,5341E+01	4,4968	71%
90	**38,9**	303,95	15,6165	0,0003	6528837,2	0,7062	4,6108E+06	2,5077E+01	4,4458	72%
120	**38,4**	303,7	14,7291	0,0003	6348323,5	0,7063	4,4835E+06	2,4883E+01	4,4082	70%
150	**37,8**	303,4	14,7849	0,0003	6129749,3	0,7063	4,3294E+06	2,4642E+01	4,3619	70%
180	**37,5**	303,25	13,6098	0,0003	6019655,3	0,7063	4,2518E+06	2,4519E+01	4,3383	68%
210	**37**	303	13,5587	0,0003	5834960,6	0,7064	4,1216E+06	2,4308E+01	4,2980	68%
240	**36,5**	302,75	13,5807	0,0003	5648749,7	0,7064	3,9903E+06	2,4091E+01	4,2566	69%
270	**36,2**	302,6	13,0148	0,0003	5536290,1	0,7064	3,9109E+06	2,3957E+01	4,2312	67%
300	**35,7**	302,35	13,1716	0,0003	5347627,4	0,7065	3,7779E+06	2,3728E+01	4,1879	68%
Média			13,7994	0,0003	6126993,9169	0,7063	4,3274E+06	24,6211	4,3585	68%

Dados para o resfriamento da placa de cobre em ar										
Placa de Cobre										
tempo (s)	**Ts (°C)**	**Tm(K)**	**hexp (W/m².K)**	**Bi**	**Gr**	**Pr**	**Ra**	**Nu**	**hteórico (W/m².K)**	**DR (%)**
0	**41**	305	----	----	----	----	----	----	----	----
30	**40,5**	304,75	14,9963	0,0002	7096657,5	0,7061	5,0109E+06	2,5665E+01	4,5602	70%
60	**39,9**	304,45	16,7840	0,0002	6885464,9	0,7061	4,8621E+06	2,5451E+01	4,5182	73%
90	**39,2**	304,1	18,6957	0,0002	6636438,8	0,7062	4,6866E+06	2,5191E+01	4,4679	76%
120	**38,7**	303,85	18,1940	0,0002	6456808,8	0,7062	4,5600E+06	2,5000E+01	4,4308	76%
150	**38,2**	303,6	18,0010	0,0002	6275703,6	0,7063	4,4323E+06	2,4804E+01	4,3929	76%
180	**37,7**	303,35	17,9684	0,0002	6093111,3	0,7063	4,3036E+06	2,4601E+01	4,3541	76%
210	**37,5**	303,25	16,4433	0,0002	6019655,3	0,7063	4,2518E+06	2,4519E+01	4,3383	74%
240	**37,2**	303,1	15,7791	0,0002	5909019,8	0,7063	4,1738E+06	2,4393E+01	4,3142	73%
270	**36,8**	302,9	15,7159	0,0002	5760658,9	0,7064	4,0692E+06	2,4222E+01	4,2815	73%
300	**36,4**	302,7	15,7101	0,0002	5611324,4	0,7064	3,9639E+06	2,4046E+01	4,2482	73%

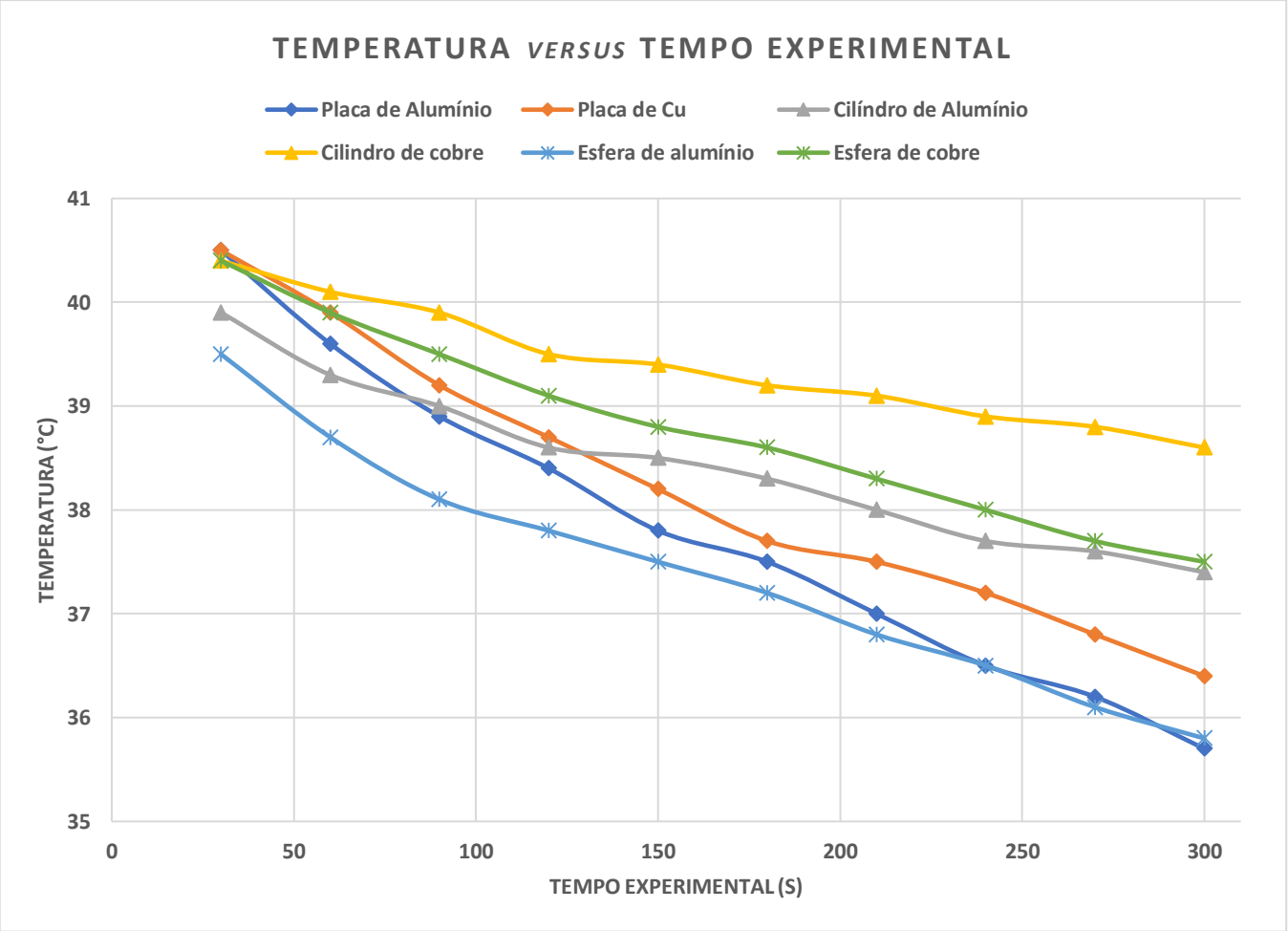
Média			16,8288	0,0002	6274484,3371	0,7063	4,4314E+06	24,7892	4,3906	74%
Dados para o resfriamento do cilindro de alumínio em ar										
Cilindro de Alúminio										
tempo (s)	**Ts (°C)**	**Tm(K)**	**hexp (W/m².K)**	**Bi**	**Gr**	**Pr**	**Ra**	**Nu**	**hteórico (W/m².K)**	**DR (%)**
0	**41**	305	----	----	----	----	----	----	----	----
30	**39,9**	304,45	53,0538	0,0023	6885464,9	0,7061	4,8621E+06	2,2848E+01	4,0561	92%
60	**39,3**	304,15	41,7336	0,0018	6672188,8	0,7062	4,7118E+06	2,2640E+01	4,0158	90%
90	**39**	304	33,0321	0,0014	6564763,1	0,7062	4,6361E+06	2,2533E+01	3,9953	88%
120	**38,6**	303,8	30,0994	0,0013	6420706,2	0,7062	4,5346E+06	2,2388E+01	3,9674	87%
150	**38,5**	303,75	25,1616	0,0011	6384544,4	0,7062	4,5091E+06	2,2352E+01	3,9604	84%
180	**38,3**	303,65	22,7891	0,0010	6312043,3	0,7063	4,4580E+06	2,2278E+01	3,9462	83%
210	**38**	303,5	21,9137	0,0010	6202845,8	0,7063	4,3810E+06	2,2165E+01	3,9246	82%
240	**37,7**	303,35	21,2991	0,0009	6093111,3	0,7063	4,3036E+06	2,2051E+01	3,9027	82%
270	**37,6**	303,3	19,5707	0,0009	6056413,3	0,7063	4,2777E+06	2,2012E+01	3,8953	80%
300	**37,4**	303,2	18,7741	0,0008	5982837,1	0,7063	4,2258E+06	2,1934E+01	3,8805	79%
Média			28,7427	0,0013	6357491,8	0,7063	4,4900E+06	22,3201	3,9544	85%
Dados para o resfriamento do cilindro de cobre em ar										
Cilindro de Cobre										
tempo (s)	**Ts (°C)**	**Tm(K)**	**hexp (W/m².K)**	**Bi**	**Gr**	**Pr**	**Ra**	**Nu**	**hteórico (W/m².K)**	**DR (%)**
0	**41**	305	----	----	----	----	----	----	----	----
30	**40,4**	304,7	40,2050	0,0010	7061602,6	0,7061	4,9862E+06	2,3016E+01	4,0888	90%
60	**40,1**	304,55	30,4152	0,0008	6956093,0	0,7061	4,9119E+06	2,2915E+01	4,0693	87%
90	**39,9**	304,45	24,9276	0,0006	6885464,9	0,7061	4,8621E+06	2,2848E+01	4,0561	84%
120	**39,5**	304,25	25,7974	0,0007	6743513,6	0,7062	4,7621E+06	2,2710E+01	4,0294	84%
150	**39,4**	304,2	22,0798	0,0006	6707880,4	0,7062	4,7370E+06	2,2675E+01	4,0226	82%
180	**39,2**	304,1	20,8251	0,0005	6636438,8	0,7062	4,6866E+06	2,2604E+01	4,0090	81%
210	**39,1**	304,05	18,8991	0,0005	6600630,2	0,7062	4,6614E+06	2,2569E+01	4,0022	79%
240	**38,9**	303,95	18,3898	0,0005	6528837,2	0,7062	4,6108E+06	2,2497E+01	3,9884	78%
270	**38,8**	303,9	17,1778	0,0004	6492852,4	0,7062	4,5854E+06	2,2461E+01	3,9814	77%

300	**38,6**	303,8	16,9708	0,0004	6420706,2	0,7062	4,5346E+06	2,2388E+01	3,9674	77%
Média			23,5688	0,0006	6703401,9260	0,7062	4,7338E+06	22,6683	4,0215	82%
Dados para o resfriamento da esfera de alumínio em ar										
Esfera de alúminio										
tempo (s)	**Ts (°C)**	**Tm(K)**	**hexp (W/m².K)**	**Bi**	**Gr**	**Pr**	**Ra**	**Nu**	**hteórico (W/m².K)**	**DR (%)**
0	**41**	305	----	----	----	----	----	----	----	----
30	**39,5**	304,25	56,6132	0,0019	220971,5	0,7062	1,5604E+05	1,1028E+01	6,1145	89%
60	**38,7**	303,85	44,4749	0,0015	211298,5	0,7062	1,4923E+05	1,0928E+01	6,0522	86%
90	**38,1**	303,55	38,1009	0,0013	203979,1	0,7063	1,4407E+05	1,0849E+01	6,0039	84%
120	**37,8**	303,4	31,8399	0,0011	200298,5	0,7063	1,4147E+05	1,0809E+01	5,9792	81%
150	**37,5**	303,25	28,1367	0,0009	196603,7	0,7063	1,3887E+05	1,0768E+01	5,9542	79%
180	**37,2**	303,1	25,7144	0,0009	192894,9	0,7063	1,3625E+05	1,0727E+01	5,9287	77%
210	**36,8**	302,9	24,6968	0,0008	187927,7	0,7064	1,3275E+05	1,0670E+01	5,8942	76%
240	**36,5**	302,75	23,3972	0,0008	184185,7	0,7064	1,3011E+05	1,0627E+01	5,8677	75%
270	**36,1**	302,55	22,9720	0,0008	179174,0	0,7064	1,2657E+05	1,0568E+01	5,8318	75%
300	**35,8**	302,4	22,1821	0,0007	175398,5	0,7064	1,2391E+05	1,0522E+01	5,8043	74%
Média			31,8128	0,0011	195273,2109	0,7063	1,3793E+05	10,7497	5,9431	80%
Dados para o resfriamento da Esfera de cobre em ar										
Esfera de Cobre										
tempo (s)	**Ts (°C)**	**Tm(K)**	**hexp (W/m².K)**	**Bi**	**Gr**	**Pr**	**Ra**	**Nu**	**hteórico (W/m².K)**	**DR (%)**
0	**41**	305	----	----	----	----	----	----	----	----
30	**40,4**	304,7	31,0918	0,0006	231394,6	0,7061	1,6339E+05	1,1132E+01	6,1801	80%
60	**39,9**	304,45	28,9160	0,0006	225622,9	0,7061	1,5932E+05	1,1075E+01	6,1440	79%
90	**39,5**	304,25	26,6000	0,0005	220971,5	0,7062	1,5604E+05	1,1028E+01	6,1145	77%
120	**39,1**	304,05	25,5768	0,0005	216289,5	0,7062	1,5274E+05	1,0980E+01	6,0845	76%
150	**38,8**	303,9	23,9115	0,0005	212757,8	0,7062	1,5025E+05	1,0943E+01	6,0616	75%
180	**38,6**	303,8	21,8735	0,0004	210393,7	0,7062	1,4859E+05	1,0918E+01	6,0461	72%
210	**38,3**	303,65	21,2928	0,0004	206833,0	0,7063	1,4608E+05	1,0880E+01	6,0226	72%
240	**38**	303,5	20,9014	0,0004	203254,9	0,7063	1,4356E+05	1,0842E+01	5,9988	71%

270	**37,7**	303,35	20,6377	0,0004	199659,1	0,7063	1,4102E+05	1,0802E+01	5,9745	71%
300	**37,5**	303,25	19,8303	0,0004	197252,1	0,7063	1,3932E+05	1,0776E+01	5,9582	70%
Média			24,0632	0,0005	212442,8925	0,7062	1,5003E+05	10,9374	6,0585	74%

Fonte: o autor.

ANEXO 8



Fonte: o autor.