

UNIVERSIDADE DO SAGRADO CORAÇÃO

JOÃO ANTONIO CELLA JUSTO

**DEMONSTRAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO FORMATO
GEOMÉTRICO E DA COMPOSIÇÃO DOS CORPOS
NA CONDUÇÃO DE CALOR TRANSIENTE**

BAURU
2012

JOÃO ANTONIO CELLA JUSTO

**DEMONSTRAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO FORMATO
GEOMÉTRICO E DA COMPOSIÇÃO DOS CORPOS
NA CONDUÇÃO DE CALOR TRANSIENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química, sob a orientação do Prof. Dr. Sandro Megale Pizzo.

BAURU
2012

J968d

Justo, João Antonio Cella

Demonstração da influência do formato geométrico e da composição dos corpos na condução de calor transiente / João Antonio Cella Justo -- 2012.

61f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Megale Pizzo.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Sagrado Coração – Bauru – SP.

1. Fenômenos de transporte. 2. Calor. 3. Condução transiente. 4. Condução. 5. Convecção. I. Pizzo, Sandro Megale. II. Título.

JOÃO ANTONIO CELLA JUSTO

**DEMONSTRAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FORMA GEOMÉTRICA E
DA COMPOSIÇÃO DOS CORPOS NA CONDUÇÃO DE CALOR
TRANSIENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas da Universidade do Sagrado Coração como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química sob a orientação do Prof. Dr. Sandro Megale Pizzo.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sandro Megale Pizzo
Universidade Sagrado Coração

Prof. Ms. Dorival Roberto Rodrigues
Universidade Sagrado Coração

Prof. Ms. Andre Luis Antunes de Almeida
Universidade Sagrado Coração

Bauru, 11 de dezembro de 2012.

Dedico este trabalho, aos meus pais que durante o curso me serviram de fonte de inspiração e força.

Ao meu irmão, que me fez a cada dia desejar ser uma pessoa melhor na busca de um dia poder servir de exemplo.

A minha avó Angelina, que como diz o nome é um “pequeno anjo”, em nome, mas enorme anjo em pessoa que tenho em minha vida.

A minha avó Ana, que sempre me motivou com seu sorriso e carinhos a seguir em frente.

Aos meus avôs Antonio(*in memorian*) e João(*in memorian*), que além de darem seus nomes a mim, onde quer que estejam sei que estão me dando apoio.

Aos meus familiares, os quais sempre me deram força e apoio para seguir em uma jornada de grande superação.

Aos meus amigos, e mais que isso, irmãos de curso que foram essenciais para a superação de desafios e a conquista deste objetivo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu coordenador, orientador, professor e muito mais que isso, amigo, Prof^o Dr. Sandro Megale Pizzo, que além de inspirar-me e auxiliar-me por meio de seu intelecto mostrou-me que os sacrifícios são essenciais para que objetivos sejam conquistados.

Aos meus amigos, e mais que isso irmãos, do curso da engenharia química, os quais nesses quase 5 anos conseguiram transformar momentos de tensão em sorrisos, momentos de dúvidas em força para a busca da solução e tornaram um curso complexo em algo totalmente prazeroso.

Aos grandes amigos Marco Aurélio Silva Lucheta e Felipe Guerra Freddi, por momentos de cumplicidade, risos e uma amizade realmente verdadeira, sendo fonte de força e motivação por meio de conversas e incentivos.

Ao Prof^o Ms. Walter Rammazzina e Prof^o Ms. Dorival Roberto Rodrigues que por muitas vezes sanarem algumas de minhas dúvidas “bizarras” e demonstraram-se mais do que mestres dissipadores de conhecimento, me deram o prazer de ter nos mesmos grandes amigos.

Agradeço também a USC por ter disponibilizado o laboratório de operações unitárias para que eu pudesse realizar meu experimento, sendo que sem tal abertura este trabalho não teria tomado forma.

Por fim agradeço a Amanda Satolli Martins, que no último semestre me ajudou a manter o equilíbrio e a cabeça no lugar em momentos de desespero, o que foi essencial para que eu conseguisse manter o foco com uma vontade imensa de dar o meu melhor.

"Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível."

(Charles Chaplin)

RESUMO

Os fenômenos de transporte são importantíssimos na formação e no trabalho do engenheiro químico. Dentro desses fenômenos existem duas ramificações: fenômenos de transporte calor e fenômenos de transporte massa. Este trabalho aborda os fenômenos de transporte que envolvem calor, que possui grande importância seja no campo acadêmico ou no industrial. O calor é muito utilizado em processos industriais, tanto no aquecimento (recebimento de calor por um corpo) ou no resfriamento (retirada de calor de um corpo), mas sempre visando o mesmo objetivo, obter o produto final com as características necessárias.

As aplicações industriais que envolvem calor são muito variadas e vão desde a esterilização de alimentos até a sua utilização em fundições, obtenção de cal, etc. O presente trabalho discute especificamente a condução de calor em regime transiente e procura demonstrar e comprovar, através do auxílio da matemática e de experimentos em laboratório, que as condições de condução no regime transiente possuem grande dependência da forma geométrica e do material de que os corpos são feitos, pois interferem diretamente na determinação de coeficientes que ajudam no melhor entendimento de como esse fenômeno ocorre tanto internamente como externamente nos corpos.

Palavras-chave: Fenômenos de transporte. Calor. Condução transiente. Condução. Convecção.

ABSTRACT

The transport phenomena are critical in the formation and work of the chemical engineer. Within these phenomena exist two branches: transport phenomena heat and transport phenomena mass. This paper aims to the transport phenomena involving heat, which has great importance both in the academic field or industry. The heat is widely used in industrial processes, either in heating (heat received by a body) or cooling (heat removal of a body), but always aiming at the same goal, to get the final product with the required characteristics. Industrial applications involving heat are large, since from its use in food sterilization until use in foundries, obtaining lime, etc. This study specifically discusses the heat conduction in transient and will seek to demonstrate and prove through the aid of mathematics and laboratory experiment that driving conditions in the transient regime have great dependence on geometry and material bodies are made because infer directly on the determination of which help in better understanding of how this phenomenon occurs internally and externally in bodies.

Keywords: Transport Phenomena. Heat. Conduction transiente. Conduction. Convection.

Lista De Ilustrações

Figura 1 - Demonstração da variação de temperatura em um corpo proporcionalmente a q_x e a área.	17
Figura 2 - Fluxos convectivos de correntes de ar quente e frio.	18
Figura 3 - Variação da condução conforme os diferentes valores de Biot.	22
Figura 4 - Aparelho que simula a condução transiente em corpos submersos.	24
Figura 5 - Corpos de prova utilizados no experimento.	25
Figura 6 - Corpos de prova esféricos utilizados no experimento.	29
Figura 7 - Corpos de prova cilíndricos utilizados no experimento.	30
Figura 8 - Relação para obtenção das fórmulas para conversão de temperaturas.	32
Figura 9 - Fórmula geral para a conversão de temperaturas.	32
Figura 10 - Partes de um paquímetro.	34
Figura 11 - Resistência elétrica(Fio Kanthal) para aquecimento do fluido de imersão.	36
Figura 12 - Esquema de montagem da resistência elétrica(Fio Kanthal).	37
Figura 13 - Corte lateral de uma bomba.	38
Figura 14 - Bomba de circulação utilizada no experimento modelo KP-110L.	39
Figura 15 - Curva da bomba KP-110L.	40
Figura 16 - Dados Fornecidos pelo fabricante da bomba KP-110L.	40
Figura 17 - Esquema de ligação dos termopares no painel de controle e leitura.	41
Figura 18 - Esquema de acoplagem do corpo ao suporte.	42
Figura 19 - Gráfico do Logaritmo negativo da razão entre as diferenças de temperatura e temperatura inicial por tempo para o corpo cilíndrico de alumínio.	44
Figura 20 - Perfil da temperatura em função do tempo para o corpo cilíndrico de alumínio.	45
Figura 21 - Gráfico do Logaritmo negativo da razão entre as diferenças de temperatura e temperatura inicial por tempo para o corpo cilíndrico de cobre.	46
Figura 22 - Perfil da temperatura em função do tempo para o corpo cilíndrico de cobre.	47
Figura 23 - Gráfico do Logaritmo negativo da razão entre as diferenças de temperatura e temperatura inicial por tempo para o corpo esférico de alumínio.	48
Figura 24 - Perfil da temperatura em função do tempo para o corpo esférico de alumínio.	49
Figura 25 - Gráfico do Logaritmo negativo da razão entre as diferenças de temperatura e temperatura inicial por tempo para o corpo esférico de cobre.	50
Figura 26 - Perfil da temperatura em função do tempo para o corpo esférico de alumínio.	51

Lista De Símbolos

q''	Fluxo térmico, W/m^2
k	Condutividade térmica, $W/(m.K)$; Constante de Boltzmann
T	Temperatura, K
x	Espaço, m
L	Comprimento característico, m
q	Taxa de transferência de calor, W
A	Área, m^2
A_s	Área de superfície, m^2
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção (coeficiente convectivo), $W/(m^2.K)$; Constante de Plank
T_s	Temperatura da superfície, K
T_∞	Temperatura do fluido, K
\bar{h}	Coefficiente convectivo médio, $W/(m^2.K)$
ρ	massa específica, kg/m^3
V	Volume, m^3
C_p/c	Calor específico, $J/(kg.K)$
θ	Diferença de temperatura, K
t	Tempo, s
ψ	Relação entre as diferenças de temperatura em um instante t pela diferença de temperatura no instante inicial (θ/θ_i)
R_{cond}	Resistência a condução
R_{conv}	Resistência a convecção
Bi	Biot

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	GERAL	13
2.2	ESPECÍFICOS	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	TRANSFERÊNCIA DE CALOR: CONDUÇÃO E CONVECÇÃO	14
3.1.1	CALOR	15
3.1.2	CONDUÇÃO	16
3.1.3	CONVECÇÃO	18
3.2	DEMONSTRAÇÃO DO MÉTODO DA CAPACITÂNCIA GLOBAL PARA A CONDUÇÃO TRANSIENTE	20
3.3	VALIDADE DA CAPACITÂNCIA GLOBAL	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	MATERIAIS	24
4.1.1	ALUMÍNIO	26
4.1.2	COBRE	28
4.1.3	FORMAS GEOMÉTRICAS DOS CORPOS	29
4.1.3.1	ESFERA	29
4.1.3.2	CILINDROS	30
4.1.4	TERMÔMETRO	31
4.1.4.1	ESCALAS TERMOMÉTRICAS	31
4.1.5	CRONÔMETRO	33
4.1.6	PAQUÍMETRO	34
4.1.7	TERMOPAR	35
4.1.8	FIO KANTHAL	36
4.1.9	BOMBA CIRCULAÇÃO (TURBOBOMBA)	38
4.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	41
5	RESULTADOS	43
5.1	CONSIDERAÇÕES	43
5.2	CILINDRO DE ALUMÍNIO	44
5.3	CILINDRO DE COBRE	46
5.4	ESFERA DE ALUMÍNIO	48
5.5	ESFERA DE COBRE	50
6	DISCUSSÃO	52
6.1	DISCUSSÃO DA VARIAÇÃO DE FORMA	52
6.2	DISCUSSÃO DA VARIAÇÃO DE MATERIAL	53
6.3	ESFERA DE ALUMÍNIO X ESFERA DE COBRE/CILINDRO DE ALUMÍNIO X CILINDRO DE COBRE	54
7	CONCLUSÃO	56

REFERÊNCIAS 58

1 INTRODUÇÃO

Primeiramente devemos entender de maneira genérica que transferência de calor ou calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço. Sempre que houver diferença de temperatura em um meio ou entre meios necessariamente existirá transferência de calor. (INCROPERA et al., 2008).

Podemos nos referir aos diferentes tipos de processos de transferência de calor por diferentes modos. Quando há um gradiente de temperatura em um meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido, denominamos a transferência de calor através do meio como sendo o processo de condução. O termo convecção se refere à transferência de calor que ocorrerá entre uma superfície e um fluido em movimento quando eles estiverem em diferentes temperaturas. O terceiro modo de transferência de calor é chamado de radiação, nesse tipo de processo devemos entender que todas as superfícies com temperatura não nula emitem energia em forma de ondas eletromagnéticas. Dessa forma, na ausência de um meio interposto participante, há transferência de calor líquida, por radiação, entre duas superfícies a diferentes temperaturas. (INCROPERA et al., 2008).

Outro ponto interessante nos estudos de transferência de calor é o conhecimento da Primeira Lei da termodinâmica, também conhecida como princípio da conservação da energia, que diz: “[...] a energia não pode ser criada nem destruída durante um processo; pode apenas mudar de forma.” (ÇENGEL, 2009, p.11).

Assim no estudo de condução em regime transiente teremos a troca de calor entre um corpo de prova e um fluido no qual o mesmo estará submerso, e teremos a migração de calor do meio de maior temperatura para o de menor temperatura, até que o equilíbrio seja atingido, e isso somente é possível devido a passagem de calor de um corpo para outro. (ÇENGEL, 2009).

Será introduzido aqui o conceito mais abordado didaticamente, o da capacitância térmica concentrada, o qual supõe a adição de uma única temperatura para a caracterização do sólido. (INCROPERA et al., 2008).

2 OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso tem como principal enfoque os seguintes objetivos:

2.1 GERAL

- Realizar um estudo abordando a condução transiente, tendo como parâmetros norteadores a temperatura, o tempo, a razão entre as diferenças de temperatura e temperatura inicial, o coeficiente de película e o número de Biot.

2.2 ESPECÍFICOS

- Demonstrar graficamente a variação de temperatura nos corpos de prova;
- Comprovar a variação no coeficiente de película dos materiais devido as suas diferentes características e junto com isso mostrar a variação do número de Biot.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR: CONDUÇÃO E CONVECÇÃO

Antes de abordarmos a condução transiente, deve-se obter a base teórica que fundamenta tal regime de transferência de calor, assim é necessário que o conceito do que é transferência de calor e de como ocorrem a condução e a convecção estejam bem fixados.

3.1.1 Calor

Primeiramente devemos saber exatamente o que é calor. Segundo Smith; Van Ness; Abbot (2007, p. 11) no livro *Introdução a Termodinâmica da Engenharia Química* “[...] calor nada mais é do que energia em movimento”.

Imaginemos dois corpos, entre os quais ocorre um gradiente de temperatura. Quando colocarmos esses dois corpos em contato, gradativamente se fizermos medições nos mesmos, poderemos notar uma variação na temperatura de ambos, até que a temperatura nos dois seja igual. Isso ocorre devido a migração de energia térmica do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura, fazendo que o equilíbrio térmico seja atingido. (INCROPERA et al., 2008).

A essa energia térmica que flui de um corpo para outro é dada a definição de calor, ou seja, calor é a energia térmica em movimento. (INCROPERA et al., 2008).

Vale lembrar que quando um sistema recebe calor, ele não a armazena nessa forma, mas sim como energia cinética e potencial dos átomos. (INCROPERA et al., 2008).

Essa definição de calor é recente, pois até tempos atrás, sua definição era dada em função da variação de temperatura da unidade de massa da água. Assim a caloria era definida como sendo a “[...] quantidade de energia que elevava a temperatura de uma unidade de água em um grau Celsius.” (SMITH; VAN NESS; ABBOT, 2007, p. 12). Existem outras definições como a do BTU, porém esse não é o enfoque do trabalho e não há necessidade de aprofundarmos em demasiado nesse tema.

Os meios de transferência de calor nos corpos que iremos usar para este trabalho são dois: condução e convecção, sendo que nos próximos tópicos (3.1.2 e 3.1.3) haverá uma breve discussão primeiramente sobre a condução e depois sobre convecção.

3.1.2 Condução

A transferência de calor por condução ocorre por dois motivos principais: um gradiente entre as temperaturas e o contato entre os corpos que possuem um diferencial de temperatura. (ÇENGEL, 2009).

De acordo com Incropera et. al. (2008, p.163) “[...] com a menção da palavra condução, devemos imediatamente visualizar conceitos de atividades atômicas e moleculares, pois são processos nesses níveis que mantêm este modo de transferência de calor”.

Para exemplificar a transferência de calor por condução vamos adotar um arranjo simples, a mão entrando em contato com uma parede. Supomos que a mão possui uma temperatura T_1 e a parede uma temperatura T_2 e que $T_1 > T_2$. Podemos assim tirar a conclusão que ao colocarmos a mão em contato com a parede o calor fluirá da mão para a parede, até que o equilíbrio térmico seja estabelecido.

Agora agrupando tudo isso em um conceito único podemos dizer que ao colocarmos dois corpos com diferentes temperaturas em contato, o corpo com maior temperatura terá calor fluindo para o corpo de menor temperatura, até que ambos tenham a mesma temperatura. Essa transferência de energia de um corpo para outro é definido como *condução*.

Vale lembrar que o sistema que exemplificamos é aberto, sendo assim haverá outras trocas de calor com o ambiente, o que nos levará a conclusão de que a condução irá continuar até que todo o sistema entre em equilíbrio. (ÇENGEL, 2009).

A quantidade de calor envolvida pode ser calculada, através da equação de Fourier, uma equação de taxa que leva em consideração a variação de temperatura e a unidade de área em que a condução ocorre. (INCROPERA et al., 2008).

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

Na equação 3.1 o valor q_x'' (W/m²) é chamado de fluxo térmico, o parâmetro K é uma propriedade de transporte, conhecida como condutividade térmica (W/(m.K)), uma característica do material da parede. (INCROPERA et al., 2008).

Em casos simples, em que a condução ocorre em regime estacionário e a distribuição das temperaturas é linear, teremos

— — (3.2)

ficando o fluxo térmico

— (3.3)

ou então

— — (3.4)

A equação acima nos fornece o fluxo térmico e o mesmo nada mais é do que a taxa de transferência de calor por unidade de área. (INCROPERA et al., 2008).

Para definir a taxa de transferência de calor por condução (W), através de uma parede plana, representada na figura 1, por exemplo, devemos fazer o produto do fluxo e da área, ficando

(3.5)

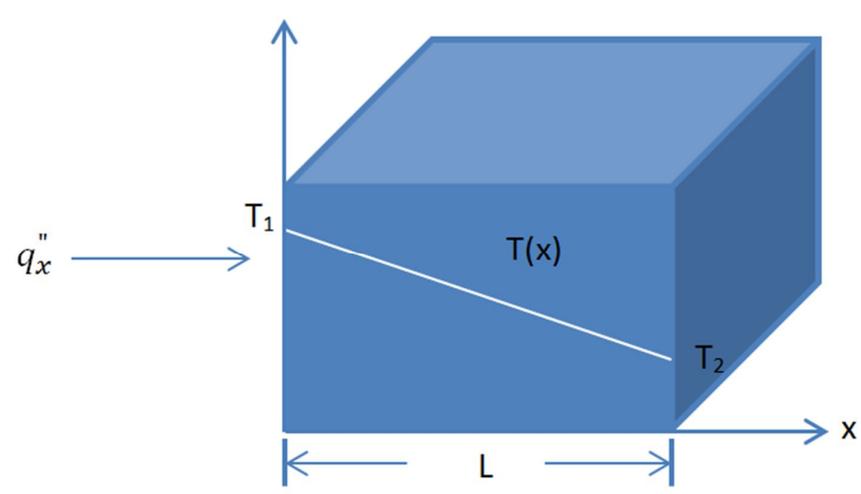


Figura 1 - Demonstração da variação de temperatura em um corpo proporcionalmente a q_x e a área.
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3 Convecção

A convecção térmica (no caso a abordada nesse experimento) nada mais é do que a transmissão de calor facilitada pelo movimento de um fluido, movimento que ocorre devido a variação da densidade do fluido e da ação da gravidade, ou graças a uma máquina, como uma bomba ou um compressor. (ÇENGEL, 2009).

A variação de densidade nesses fluidos ocorre devido a dilatação do material, assim, fluidos com maior temperatura tornam-se menos densos e tendem a ficar nas partes mais altas e os fluidos com menor temperatura tendem a ficar nas regiões inferiores, o que pode ser representada na figura 2. (ÇENGEL, 2009).



Figura 2 - Fluxos convectivos de correntes de ar quente e frio.
Fonte: Fisbhen (2009).

Vamos imaginar um fluido com uma certa velocidade V e temperatura T_f , escoando sobre uma certa superfície de área A_s .

É admitido também que a superfície com que o fluido irá estar em contato possui uma temperatura uniforme em todo seu comprimento denominada como T_s e se, por fim, supusermos que $T_s > T_f$, iremos ter a transferência de calor por convecção (ÇENGEL, 2009).

Antes de expor o desenvolvimento matemático, devemos lembrar, conforme exposto em Incropera et al.(2008, p.164) que “o fluxo térmico na superfície e o coeficiente de transferência de calor convectivo variam ao longo da superfície”. A variação citada anteriormente provém das diferenças da área de troca térmica, sendo que a mesma, conforme será visto na equação 3.6, varia ao longo da superfície e influencia diretamente tais parâmetros.

Portanto, podemos definir a taxa total de transferência de calor por meio da integração do fluxo local ao longo da superfície. Dessa exposição teremos que

$$(3.6)$$

A lei de resfriamento de Newton é dada por

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (3.7)$$

Substituindo a equação 3.7 na 3.6, teremos

$$q = (T_s - T_\infty) \int_{A_s} h dA_s \quad (3.8)$$

Definindo um coeficiente médio \bar{h} para a superfície toda, a taxa total de calor assume a forma

$$q = \bar{h}A_s(T_s - T_\infty) \quad (3.9)$$

Igualando a equação 3.8 com a equação 3.9, obtemos

$$\bar{h} = \frac{1}{A_s} \int_{A_s} h dA_s \quad (3.10)$$

Sendo que a mesma mostra que o valor do coeficiente de película médio é dependente da área superficial do corpo e do coeficiente de película.

3.2 DEMONSTRAÇÃO DO MÉTODO DA CAPACITÂNCIA GLOBAL PARA A CONDUÇÃO TRANSIENTE

Com os conceitos de calor, condução e convecção bem definidos, podemos agora discorrer sobre a capacitância global aplicada a condução transiente.

Na condução de calor transiente, podemos observar dois fenômenos acontecendo simultaneamente: condução e convecção. (INCROPERA et al., 2008).

A convecção se dá na troca de calor entre a parede do corpo de estudo e o fluido que o permeia. Já a condução ocorre no interior do corpo de estudo, ou seja, o calor flui de átomo a átomo, até que o equilíbrio seja atingido. (INCROPERA et al., 2008).

Assim, pode ser estabelecida entre os dois fenômenos uma relação dada pela conservação da energia:

$$-E_{saida} = E_{entrada} \quad (4.1)$$

Ou mais detalhadamente,

$$-hAs(T - T_{\infty}) = \rho Vc \frac{dT}{dt} \quad (4.2)$$

Adotando que a diferença de temperatura é dada por,

$$\theta = T - T_{\infty} \quad (4.3)$$

Assim podemos admitir que $(d\theta/dt) = (dT/dt)$, admitindo T_{∞} constante, teremos

$$-\theta = \frac{\rho Vc}{hAs} \frac{dT}{dt} \quad (4.4)$$

Agora desenvolvendo matematicamente, podemos fazer $t_0 = 0$ e $T(0) = T_i$, obtendo assim,

$$\frac{\rho Vc}{hAs} \int_{T_i}^{\theta} \frac{d\theta}{\theta} = - \int_0^t dt \quad (4.5)$$

Onde iremos adotar

$$\theta_i = T_i - T_\infty \quad (4.6)$$

E também utilizaremos

$$\Psi = \frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (4.7)$$

Assim, efetuadas as devidas integrações iremos obter

$$\Psi = \frac{\theta}{\theta_i} = \frac{(T - T_\infty)}{(T_i - T_\infty)} = \exp \left[- \left(\frac{hAs}{\rho Vc} \right) t \right] \quad (4.8)$$

Rearranjando a equação acima, temos

$$\ln \Psi = - \left(\frac{hAs}{\rho Vc} \right) t \quad (4.9)$$

Por fim, fazendo-se a troca do sinal, teremos

$$- \ln \Psi = \frac{hAs}{\rho Vc} t \quad (4.10)$$

Onde iremos utilizar tal equação para a determinação do coeficiente de película(h), através de um gráfico $-\ln\Psi$ x t(tempo).

Apesar de todas demonstrações matemática feitas acima, não podemos utilizar a capacitância global em qualquer caso, sendo que é necessário realizar uma averiguação dos dados, para verificar se as condições são válidas ou não.

3.3 VALIDADE DA CAPACITÂNCIA GLOBAL

O método da capacitância global é o modelo mais simples que pode ser utilizado para a resolução de problemas transientes de aquecimento e de resfriamento. (INCROPERA et al., 2008).

Porém o seu uso possui condições específicas, sendo que fora das mesmas, seu resultado torna-se insatisfatório. Uma das condições a serem satisfeitas para a utilização da capacitância global é o número de Biot, o qual define como ocorrerá a distribuição das temperaturas ao longo do corpo, ou seja, como o calor irá fluir. (INCROPERA et al., 2008).

Para melhor demonstrar a influência de Biot na condução transiente, vamos observar a figura 3, onde a mesma demonstra como o calor flui por uma parede e como o mesmo flui para o fluido que a envolve, conforme a variação do número de Biot. (INCROPERA et al., 2008).

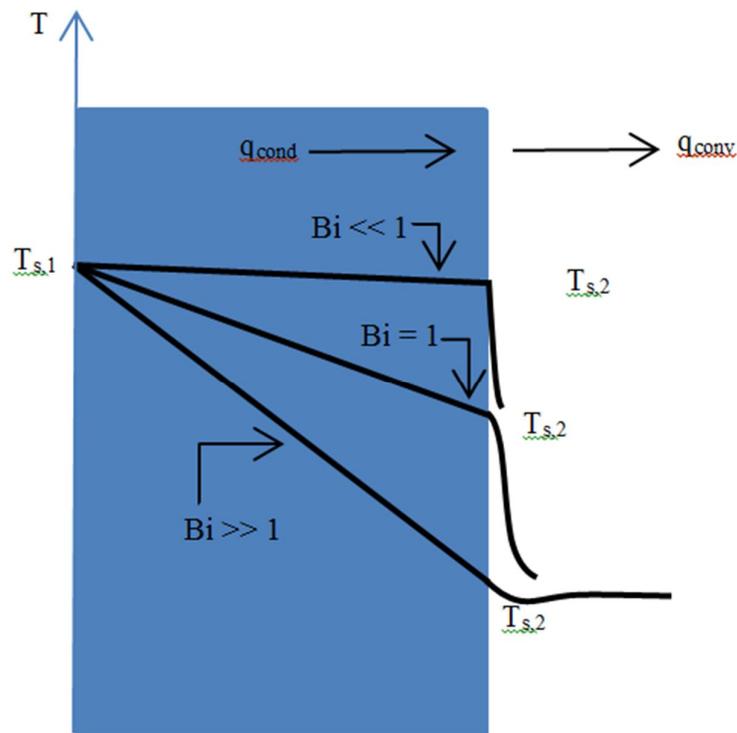


Figura 3 - Variação da condução conforme os diferentes valores de Biot.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Esmiuçando em palavras a imagem acima descreve uma condição em que uma superfície do corpo de prova é mantida a temperatura e a outra é exposta a um fluido que

possui uma temperatura $T_\infty < T_{s,1}$. A temperatura na superfície da parede que está em contato com o fluido terá, portanto, um valor intermediário $T_{s,2}$. Assim, teremos a condição $T_\infty < T_{s,2} < T_{s,1}$. Essa condição descrita nos dá o seguinte balanço de energia na superfície:

$$\frac{k.A}{L}(T_{s,1} - T_{s,2}) = h.A.(T_{s,2} - T_\infty) \quad (4.11)$$

Rearranjando a equação, obtemos

$$\frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{T_{s,2} - T_\infty} = \frac{(L/k.A)}{(1/h.A)} = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{hL}{k} = Bi \quad (4.12)$$

O número de Biot nada mais é do que uma relação entre a resistência do material a transferência de calor por condução e a resistência a transferência de calor por convecção, sendo que isso pode ser expresso pela grandeza hL/k . (INCROPERA et al., 2008).

Assim podemos parametrizar informações para o número de Biot: quando Biot $\ll 1$ temos uma condição em que pode-se assumir que o gradiente da distribuição das temperaturas é uniforme na parte interna do sólido, em qualquer instante do processo; para Biot $\gg 1$, a diferença da temperatura ao longo do sólido se torna maior do que a diferença presente entre a superfície e o fluido, gerando um modelo não eficiente para os devidos cálculos. (INCROPERA et al., 2008).

Firmando o anteriormente exposto, a importância da capacitância global é a simplicidade da mesma para a resolução de problemas de transferência de calor transiente. Porém vale lembrar que uma condição principal deve ser checada, para saber se o método é aplicável ou não, sendo a mesma

$$Bi = \frac{hL}{k} < 0,1 \quad (4.13)$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Para a realização completa de um conjunto de experiências elaboradas com vista nos objetivos propostos neste trabalho, foram utilizados os seguintes materiais:

- ✓ Esferas de alumínio e cobre;
- ✓ Cilindros de alumínio e cobre;
- ✓ Termômetro;
- ✓ Cronômetro;
- ✓ Paquímetro;
- ✓ Trena;
- ✓ Termopar;
- ✓ Fluido de submersão (água);
- ✓ Equipamento didático para estudo de corpos submersos (figura 4).

A figura 4 traz o aparelho utilizado para simular a situação de condução transiente de calor. Já a figura 5 é referente aos corpos utilizados no experimento, os quais foram as fontes dos dados que alimentam as tabelas de dados que são essenciais para a conclusão deste trabalho.



Figura 4 - Aparelho que simula a condução transiente em corpos submersos.
Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 5 - Corpos de prova utilizados no experimento.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir serão apresentados em detalhes os materiais e equipamentos utilizados.

4.1.1 Alumínio

O alumínio é um metal mole e de boa ductilidade. Possui baixa resistência mecânica em sua forma pura, sendo que para aplicações estruturais são utilizadas as suas ligas com outros metais. Também possui uma densidade baixa ($2,73 \text{ g/cm}^3$, a 25° C). Possui boa característica de condução térmica e também elétrica. Atualmente é o segundo metal com maior produção mundial, atrás apenas do ferro. (LEE, 1999).

Apesar de o alumínio ser um metal encontrado em abundância na crosta terrestre (8,1%) raramente é encontrado livre. Suas aplicações industriais são relativamente recentes, sendo produzido em escala industrial a partir do final do século XIX. Quando foi descoberto verificou-se que a sua separação das rochas que o continham era extremamente difícil. Como consequência, durante algum tempo, foi considerado um metal precioso, mais valioso que o ouro. Com o avanço dos processos de obtenção os preços baixaram continuamente até colapsar em 1889, devido à descoberta anterior de um método simples de extração do metal. É dado a Friedrich Wöhler o reconhecimento do isolamento do alumínio, fato que ocorreu em 1827, apesar de o metal ter sido obtido impuro alguns anos antes pelo físico e químico Hans Christian Ørsted. (SHREVE; BRINK JUNIOR, 1975).

O processo ordinário de obtenção do alumínio ocorre em duas etapas: a obtenção da alumina pelo processo Bayer e, posteriormente, a eletrólise do óxido para obter o alumínio. A elevada reatividade do alumínio impede extraí-lo da alumina mediante a redução, sendo necessário obtê-lo através da eletrólise ígnea do óxido, o que exige a fusão deste composto. A alumina possui um ponto de fusão extremamente alto (2000° C) tornando inviável economicamente a extração do metal. Porém, a adição de um fundente, no caso a criolita, permite que a eletrólise ocorra a uma temperatura menor, de aproximadamente 1000° C . Em alguns processos a criolita está sendo substituída pela ciolita, um fluoreto artificial de alumínio, sódio e cálcio. (SHREVE; BRINK JUNIOR, 1975).

O processo acima descrito, que viabiliza a produção de alumínio, foi descoberto pelo estadunidense Charles Martin Hall.

As principais vantagens em se utilizar o alumínio são:

- Leveza;
- Condutibilidade elétrica e térmica;
- Impermeabilidade e opacidade;

- Alta relação resistência/peso;
- Durabilidade;
- Moldabilidade e soldabilidade;
- Resistência à corrosão;
- Resistência e dureza;
- Reciclabilidade;
- Apassivação.

4.1.2 Cobre

Classificado como metal de transição, pertence ao grupo 11 da Classificação Periódica dos Elementos, o cobre é um dos metais mais importantes industrialmente. De coloração avermelhada, dúctil e maleável, este metal é bom condutor de eletricidade e calor. (LEE, 1999).

O minério mais comum para a extração do cobre é a calcoprita, CuFeS_2 . A calcoprita possui um brilho metálico e a coloração próxima a do cobre. (LEE, 1999).

Primeiramente, é realizada a calcinação do minério para obter um material com percentagem de 15 a 25% de cobre em massa. Após isso, é feita a fusão visando aumentar o percentual de cobre contido entre 25 e 45 %. Posteriormente ao processo de fusão, ocorre a refinação, sendo que na saída já obtêm-se o cobre bruto. Por fim, basta refinar eletroliticamente o cobre bruto, para que o cobre com a devida pureza seja obtido. (ROJAS, 2004).

O principal uso do cobre é no campo da eletricidade: mais de 60 % do cobre refinado que se consome no mundo tem este destino, produzido em forma de arames e cabos. Também é muito usado em instalações de água, gás e calefação, devido a suas características de ótimo condutor térmico. (ROJAS, 2004).

As principais vantagens de sua utilização são:

- Fácil instalação;
- Duradouro;
- Rentável;
- Ecológico;
- Resistente.

4.1.3 Formas geométricas dos corpos

Neste trabalho foram utilizadas duas formas geométricas distintas de corpos: esfera e cilindro.

4.1.3.1 Esfera

As dimensões aferidas das esferas utilizadas no trabalho são:

$$D = 0,5080 \text{ m}$$

$$r = 0,2540 \text{ m}$$

$$A = 4*\pi*r^2 = 0,8103 \text{ m}^2$$

$$V = (4*\pi*r^3)/3 = 0,0686 \text{ m}^3$$

$$Lc = V/A = 0,0847 \text{ m}$$



Figura 6 - Corpos de prova esféricos utilizados no experimento.
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3.2 Cilindros

As dimensões aferidas dos cilindros utilizados no trabalho são:

$$D = 0,0509 \text{ m}$$

$$r = 0,0255 \text{ m}$$

$$L = 0,1527 \text{ m}$$

$$A = 2 * \pi * r * (r + L) = 0,0285 \text{ m}^2$$

$$V = A * L = 0,0003 \text{ m}^3$$

$$L_c = V/A = 0,0109 \text{ m}$$



Figura 7 - Corpos de prova cilíndricos utilizados no experimento.
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.4 Termômetro

É o instrumento usado para medir o grau de agitação térmica de um corpo, ou seja, a temperatura. Sendo que o mesmo pode ser dividido em três partes:

- Bulbo - Parte que contém a substância termométrica;
- Capilar - Maior parte do termômetro, ela contém a escala termométrica;
- Substância Termométrica - Substância colocada no interior do termômetro deve possuir dilatação regular, geralmente a substância utilizada é o mercúrio.

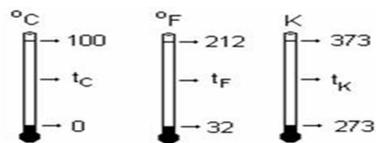
O termômetro funciona com o princípio de equilíbrio térmico, ou seja, ao ser colocado em contato com um corpo ao passar do tempo ele atinge o equilíbrio térmico, fazendo com que a substância termométrica se dilate ou contraia, e assim sendo possível saber a temperatura mediante observação do menisco da substância termométrica, devido ao menisco possuir graduação indicando as devidas temperaturas.

4.1.4.1 Escalas termométricas

Abordaremos três escalas: a utilizada no Brasil e na maior parte do mundo que é a escala Celsius desenvolvida pelo físico sueco Anders Celsius (1701 – 1744); a segunda escala é utilizada pelos Estados Unidos, a escala Fahrenheit desenvolvida por Daniel G. Fahrenheit (1685 – 1736); a terceira é a escala absoluta Kelvin desenvolvida por William Thomson (1824 – 1907), mais conhecido por Lorde Kelvin, sendo esta última utilizada pelo Sistema Internacional de Unidades.

Vale lembrar que a escala Kelvin não utiliza em seu símbolo o grau (°).

Afim de obtermos conversões de escalas, devemos relacionar as escalas e determinar uma relação de conversão entre elas, bastando elaborar uma expressão de proporção entre elas, a partir de valores conhecidos:



$$\frac{t_C - 0}{100 - 0} = \frac{t_F - 32}{212 - 32} = \frac{t_K - 273}{373 - 273}$$

Ou ainda:

$$\frac{t_C}{100} = \frac{t_F - 32}{180} = \frac{t_K - 273}{100}$$

Figura 8 - Relação para obtenção das fórmulas para conversão de temperaturas.
Fonte: Termômetro (2012).

Dividindo todos os denominadores por 20, temos:

$$\boxed{\frac{t_C}{5} = \frac{t_F - 32}{9} = \frac{t_K - 273}{5}}$$

Figura 9 - Fórmula geral para a conversão de temperaturas .
Fonte: Termômetro (2012).

4.1.5 Cronômetro

É o equipamento utilizado para realizar medições de tempo com precisão.

O cronômetro tem a propriedade de gravar o tempo conforme a necessidade, tornando-se extremamente útil devido a essa característica.

As capacidades de medição dos cronômetros variam, podendo medir desde horas até unidades muito inferiores, como milésimos de segundo por exemplo.

4.1.6 Paquímetro

Paquímetro (grego: paqui (espessura) e metro (medida)), é um instrumento utilizado para medir a distância entre dois pontos simetricamente opostos em um objeto. Para realizar a medição, basta ajustar o equipamento entre dois pontos. Para verificar a medida basta retirá-lo do local e a medição é lida em sua régua. O nônio ou vernier é a escala de medição contida no cursor móvel do paquímetro, que permite uma precisão decimal de leitura através do alinhamento desta escala com uma medida da régua.

Os paquímetros são feitos de plástico, com haste metálica, ou inteiramente de aço inoxidável. Suas graduações são calibradas a 20 °C.

Ele apresenta uma precisão menor do que o micrômetro.

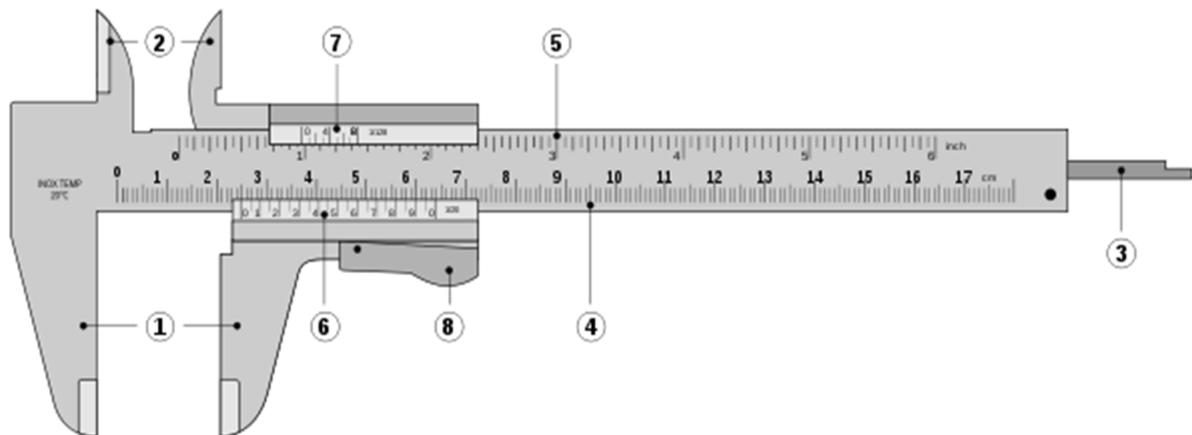


Figura 10 – Partes de um paquímetro.
Fonte: Gaspar (2006).

As partes acima numeradas são respectivamente: 1: encostos, 2: orelhas, 3: haste de profundidade, 4: escala inferior (graduada em mm), 5: escala superior (graduada em polegadas), 6: nônio ou vernier inferior (mm), 7: nônio ou vernier superior (polegada), 8: trava.

4.1.7 Termopar

Termopares são medidores de temperatura que baseiam-se no efeito de Seebeck para determinar valores quantitativos.

O efeito Seebeck se dá quando duas junções são mantidas a diferentes temperaturas e uma corrente de difusão líquida é induzida. Se o circuito é interrompido em um ponto qualquer, pode-se medir, através de um voltímetro, uma diferença de potencial (V) que é função da diferença de temperatura das duas junções e do tipo de material dos fios. Essa tensão é chamada Efeito Seebeck, em homenagem a Thomas Seebeck que em 1821 descobriu esse fenômeno (GÜTS; PAULO, 1998).

Assim o aparelho que exibe a leitura da temperatura não faz nada mais que converter a tensão, resultante desse efeito, na temperatura que fez com que ela fosse gerada.

4.1.8 Fio kanthal

O fio Kanthal nada mais é do que uma resistência elétrica, constituída por ligas metálicas variadas, com composições químicas definidas pela natureza específicas do meio que será aquecido e do material com que ficarão em contato e pelas características de aquecimento, além de outros fatores.

O aquecimento se dá devido ao efeito Joule. Quando uma corrente atravessa qualquer dispositivo que apresente uma resistência elétrica, o resultado é que a energia gasta no processo de vencer esta resistência se converte em calor. Este efeito é conhecido por efeito térmico ou efeito Joule. (SERWAY; JEWETT JUNIOR, 2004).

A energia liberada é medida em Joules, mas em eletrônica é comum usarmos a potência convertida em calor, que é a quantidade de energia em Joules liberada em cada segundo. Esta quantidade recebe o nome de potência elétrica e tem sua própria unidade que é o Watt (W). Assim, 1 W equivale a 1 Joule por segundo. (SERWAY; JEWETT JUNIOR, 2004).



Figura 11 - Resistência elétrica (Fio Kanthal) para aquecimento do fluido de imersão
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 16 temos uma representação esquematizada da resistência elétrica (Fio Kanthal) e suas devidas dimensões.

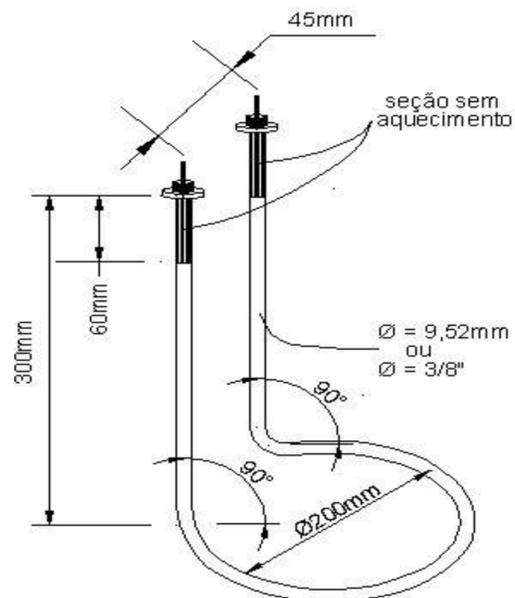


Figura 12 - Esquema de montagem da resistência elétrica (Fio Kanthal)
Fonte: Manual...[200-?]

4.1.9 Bomba circulação (turbobomba)

A bomba utilizada no equipamento para efetuar a circulação do fluido e garantir a homogeneidade da temperatura é uma turbobomba.

Segundo Macintyre (2010, p.43) “as turbobombas têm como principal características possuírem uma parte rotatória, a qual é usualmente chamada de rotor e tem como principal função exercer sobre o líquido forças que resultem em aceleração.”

A finalidade do rotor, também chamado de “impulsor” ou “impelidor”, é comunicar à massa líquida aceleração, para que adquira energia cinética e se realize assim a transformação da energia mecânica de que está dotado. É em essência, um disco ou uma peça de formato cônico dotada de pás. (MACINTYRE, 2010, p.43).

Além do rotor, as turbobombas necessitam também de outro componente, chamado difusor, sendo o mesmo responsável em transformar a energia cinética contida no líquido, que sai do rotor, em energia de pressão. Essa transformação de energia é essencial para que o líquido possa escoar com a velocidade desejada, uma vez que o mesmo enfrenta a pressão que se opõe a seu escoamento. Esse princípio pode ser observado na equação de Bernoulli, pois o difusor geralmente tem seção crescente, fazendo com que haja a diminuição da velocidade do líquido que por ele escoar somado a um aumento da pressão. (MACINTYRE, 2010).

A figura 15 demonstra de forma clara as partes descritas da bomba, assim como outros componentes também necessários para o seu funcionamento.

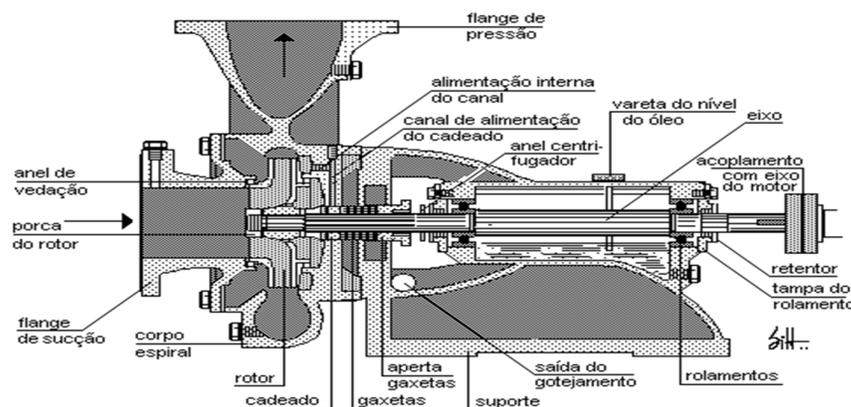


Figura 13 - Corte lateral de uma bomba.
Fonte: Venancio (2009, p.2).

A bomba utilizada no experimento (Figura 16) é uma turbobomba centrífuga, que necessita de um enchimento prévio com o líquido a ser bombeado, a esse procedimento dá-se o nome de escorva. Esse procedimento é exigido, uma vez que a turbobomba centrífuga tem certas folgas entre alguns componentes, e também visa retirar o ar do sistema, pois durante o bombeamento as bolhas que ficam em meio ao fluido e sofrem pressão maior que a pressão interna, causando implosão das bolhas e dano ao equipamento (MACINTYRE, 2010).



Figura 14 - Bomba de circulação utilizada no experimento modelo KP-110L.
Fonte: Elaborado pelo autor.

O princípio de funcionamento deste equipamento baseia-se na formação de zonas de altas e baixas pressões. Quando inicia-se o movimento do rotor e do líquido contido na turbobomba, a força centrífuga gerada por esse movimento cria uma zona de alta pressão na periferia do rotor e uma zona de baixa pressão na sua entrada, o que gera um deslocamento do fluido para a saída dos canais do rotor e a boca de recalque da bomba. A essa variação de pressão dá-se o nome de gradiente hidráulico e é ele o responsável pelo funcionamento das turbobombas (MACINTYRE, 2010).

Vale lembrar que as bombas utilizadas tanto em experimentos de laboratório quanto em escala industrial, devem ser dimensionadas meticulosamente, para que não ocorram problemas de ineficiência de processo e também para que o equipamento não sofra danos por esforço demasiado.

Uma das informações mais importantes para realizar-se os cálculos de eficiência é a curva da bomba (Figura 17), a qual oferece parâmetros para que o responsável pelo dimensionamento deste equipamento possa realizar o cálculo de modo adequado e preciso.

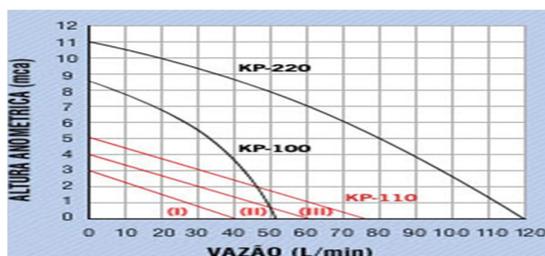


Figura 15 - Curva da bomba KP-110L.

Fonte: Circuladores... [200-?].

Também são necessários dados técnicos sobre a bomba (Figura 18), os quais são oferecidos pelo fornecedor, uma vez que estas especificações variam para cada modelo e para cada fabricante, e são essenciais para a escolha da bomba a ser utilizada.

MODELO	KP 110
Potência (W)	100/85/70 (1/8 CV)
Voltagem (V)	220
Frequência (Hz)	60
Temperatura máx. de tolerância (C)	85
Altura manométrica máxima (mca)	5
Vazão (L/min)	60 (a 1.0 mca)
Pressão de entrada Água (kgf/cm ²)	até 4
Bitolas - entrada/saída (mm)	28 x ¾" M
Dimensões: A x L x E (cm)	13 x 12 x 11
Peso (kg)	2

Figura 16 - Dados Fornecidos pelo fabricante da bomba KP-110L

Fonte: Circuladores... [200-?].

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Primeiramente deve-se adicionar o fluido de submersão (água) aos reservatórios, sendo que o fluido deve ser adicionado até que chegue a altura da parte inferior do dreno do fluido.

Após a adição do fluido a bomba é ligada, e a chave de operação é regulada na posição II.

Com a bomba ligada, o fluido é transferido de um reservatório para outro, visando manter a uniformidade das temperaturas.

Assim liga-se a resistência para que o fluido seja aquecido até a temperatura constante de 68° C, sendo aferida com auxílio de um termômetro de mercúrio. Conforme manual de operação do equipamento, a resistência (fio Kanthal) deve ser ligada inicialmente com uma tensão de 110V por 20 minutos, para evitar o rompimento do fio Kanthal, sendo que posteriormente a voltagem deve ser alterada para 220V.

Também é importante verificar se os termopares estão corretamente conectados ao indicador de temperatura (Figura 19).

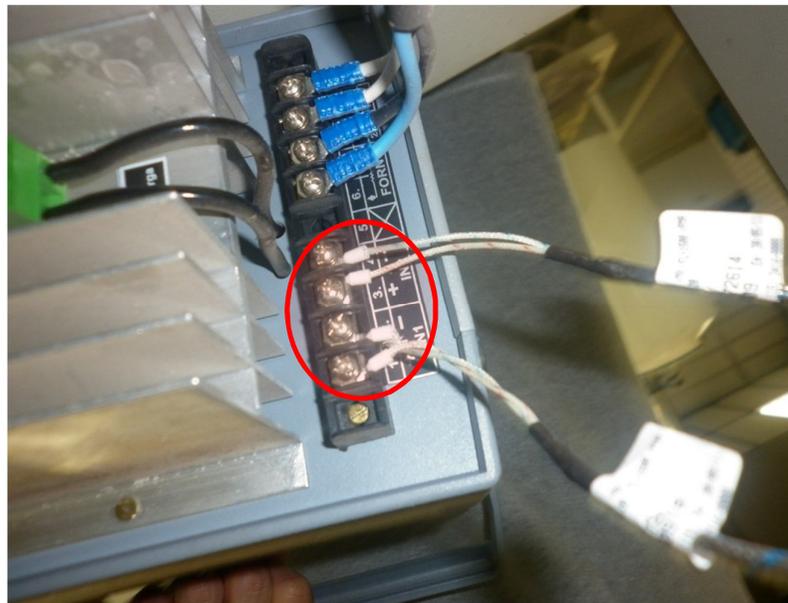


Figura 17 - Esquema de ligação dos termopares no painel de controle e leitura.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Depois de ligados os termopares, deve-se adicionar os corpos de prova, um a um, e coletar as suas temperaturas de 10 em 10 segundos, até que a temperatura indicada no visor do medidor de temperatura indique 68°C (temperatura igual a do fluido).



Figura 18 - Esquema de acoplagem do corpo ao suporte.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os corpos não devem ser suspensos pelo fio e nem pela haste do termopar, visando que não seja causado nenhum dano ao equipamento e nem tampouco algum dano que possa causar erro na medição das temperaturas. Para tal fim existe o suporte (Figura 22), que tem exatamente a função de sustentação dos corpos de prova.

5 RESULTADOS

5.1 CONSIDERAÇÕES

Neste experimento iremos utilizar dados termodinâmicos. Sendo assim temos de conhecer temperatura e pressão de operação dos equipamentos para que os valores de c_p , k e ρ sejam estipulados.

Os dados termodinâmicos utilizados foram retirados do livro Transferência de Calor e Massa de Y. A. Çengel, sendo que nesta obra os valores são referentes as temperaturas de 300 K e 400 K a pressão de 1 atmosfera.

Como a temperatura adotada para o cálculo dos valores foi de 28° C (301,15 K) em todos os casos, optou-se por utilizar os valores dos coeficientes termodinâmicos à temperatura de 300 K, pois é bem próxima do necessário.

Na formulação dos gráficos $-\ln\psi \times t$, foram ignorados algumas medições de temperatura, pois gerariam descontinuidade do gráfico, devido as suas repetições nos espaços de tempo. Portanto, somente foram considerados, para a montagem dos gráficos, os espaços de tempo em que as temperaturas variaram.

Também para a confecção dos gráficos foram ignoradas as medidas dos últimos tempos medidos, pois os mesmos geram dados inconsistentes de logaritmo neperiano, gerando incoerência no gráfico, assim tal consideração fez-se necessária para a plotagem.

Por fim vale lembrar que sempre que um corpo sofre um aumento de temperatura o mesmo tende a dilatar, e o efeito de dilatação dos corpos será desprezado também para este experimento, uma vez que os mesmos influenciam na área, no volume e no comprimento superficial.

5.2 CILINDRO DE ALUMÍNIO

O cilindro de alumínio utilizado estava inicialmente a temperatura de 26° C(299,15 K). Seu diâmetro 0,0509 metros e a altura 0,1527 metros. Assim podemos obter a área de 0,0285m² e um volume de 0,0003 m³. O comprimento característico (razão entre o volume a área) foi constatado com a medida de 0,0109 m.

O coeficiente de troca térmica(k) encontrado na literatura para o alumínio foi de 237 W/m.K, o seu calor específico (cp) utilizado foi de 903 J/Kg.K e densidade(ρ) de 2702 kg/m³(25° C).

Os dados coletados em laboratório para este corpo de prova constam na tabela 1.

Tabela 1 - Dados do corpo cilíndrico de alumínio.

Tc (□C)	Tc(K)	t(s)	$\theta_i(T_i - T_\infty)$	$\theta(T - T_\infty)$	$\Psi (\theta/\theta_i)$	Ln Ψ	-Ln Ψ
26	299,15	0	-42	-42	1	0	0
32	305,15	10	-42	-36	0,857142857	-0,15415	0,154151
42	315,15	20	-42	-26	0,619047619	-0,47957	0,479573
51	324,15	30	-42	-17	0,404761905	-0,90446	0,904456
57	330,15	40	-42	-11	0,261904762	-1,33977	1,339774
61	334,15	50	-42	-7	0,166666667	-1,79176	1,791759
64	337,15	60	-42	-4	0,095238095	-2,35138	2,351375
65	338,15	70	-42	-3	0,071428571	-2,63906	2,639057
66	339,15	80	-42	-2	0,047619048	-3,04452	3,044522
67	340,15	90	-42	-1	0,023809524	-3,73767	3,73767
67	340,15	100	-42	-1	0,023809524	-3,73767	3,73767
68	341,15	110	-42	0	0	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados acima fornecem os seguintes gráficos:

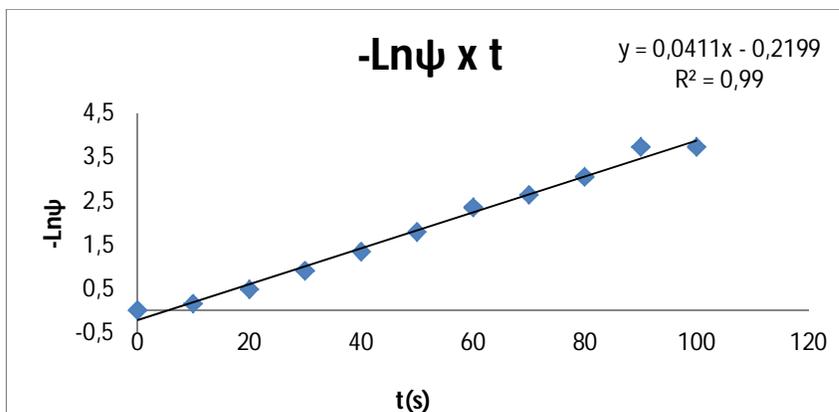


Figura 19 - Gráfico do Logaritmo negativo da razão entre as diferenças de temperatura e temperatura inicial por tempo para o corpo cilíndrico de alumínio.

Fonte: Elaborado pelo autor.

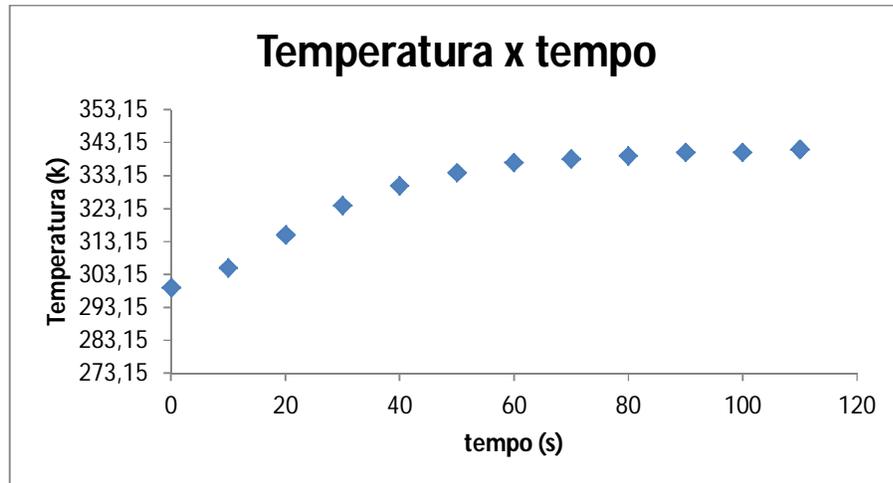


Figura 20 - Perfil da temperatura em função do tempo para o corpo cilíndrico de alumínio.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Aplicando-se a regressão linear no gráfico $-\ln \psi$ x t obtêm-se a equação $y = 0,0411x - 0,2199$, sendo que da mesma retiramos o termo “a”, o qual será utilizado em comparação com a parte $\frac{hAs}{\rho Vc}$, derivada da equação $-\ln \Psi = \frac{hAs}{\rho Vc} t$, sendo que de tal comparação ($a = \frac{hAs}{\rho Vc}$) retiramos o valor do coeficiente de película (também conhecido como coeficiente de filme), h .

Assim seguem os cálculos abaixo:

$$h = \frac{a \cdot \rho \cdot c \cdot V}{A} \text{ (J/(m}^2 \cdot \text{K))} = 1093,7698 \text{ J/Kg.m}^2$$

Com o valor do coeficiente de película especificado podemos determinar o número de Biot, sendo o mesmo:

$$Bi = hLc/k = 0,0503$$

5.3 CILINDRO DE COBRE

O cilindro de cobre utilizado estava inicialmente a temperatura de 26° C(299,15 K). Seu diâmetro 0,0509 metros e a altura 0,1527 metros. Assim obtemos a área de 0,0285m² e um volume de 0,0003 m³. O comprimento característica (razão entre o volume a área) foi constatado com a medida de 0,0109 m.

O coeficiente de troca térmica (k) encontrado para o alumínio foi de 401 W/m.K, o seu calor específico (cp) utilizado foi de 385 J/Kg.K e densidade (ρ) de 8933 kg/m³(25° C).

Os dados coletados em laboratório para este corpo estão na tabela 2.

Tabela 2 - Dados do corpo cilíndrico de cobre.

Tc (□C)	Tc(K)	t(s)	$\theta_i(T_i - T_\infty)$	$\theta(T - T_\infty)$	$\Psi (\theta/\theta_i)$	Ln Ψ	-Ln Ψ
26	299,15	0	-42	-42	1	0	0
32	305,15	10	-42	-36	0,857142857	-0,15415068	0,15415068
40	313,15	20	-42	-28	0,666666667	-0,405465108	0,405465108
48	321,15	30	-42	-20	0,476190476	-0,741937345	0,741937345
54	327,15	40	-42	-14	0,333333333	-1,098612289	1,098612289
58	331,15	50	-42	-10	0,238095238	-1,435084525	1,435084525
61	334,15	60	-42	-7	0,166666667	-1,791759469	1,791759469
63	336,15	70	-42	-5	0,119047619	-2,128231706	2,128231706
65	338,15	80	-42	-3	0,071428571	-2,63905733	2,63905733
65	338,15	90	-42	-3	0,071428571	-2,63905733	2,63905733
66	339,15	100	-42	-2	0,047619048	-3,044522438	3,044522438
67	340,15	120	-42	-1	0,023809524	-3,737669618	3,737669618
68	341,15	290	-42	0	0	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados acima fornecem os seguintes gráficos:

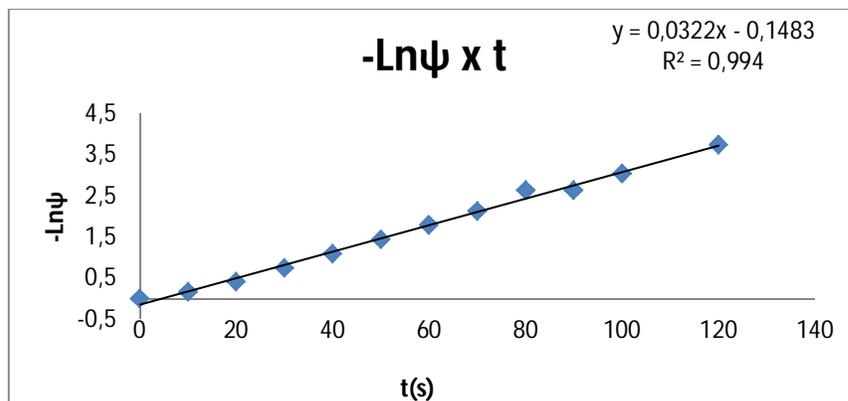


Figura 21- Gráfico do Logaritmo negativo da razão entre as diferenças de temperatura e temperatura inicial por tempo para o corpo cilíndrico de cobre.

Fonte: Elaborado pelo autor.

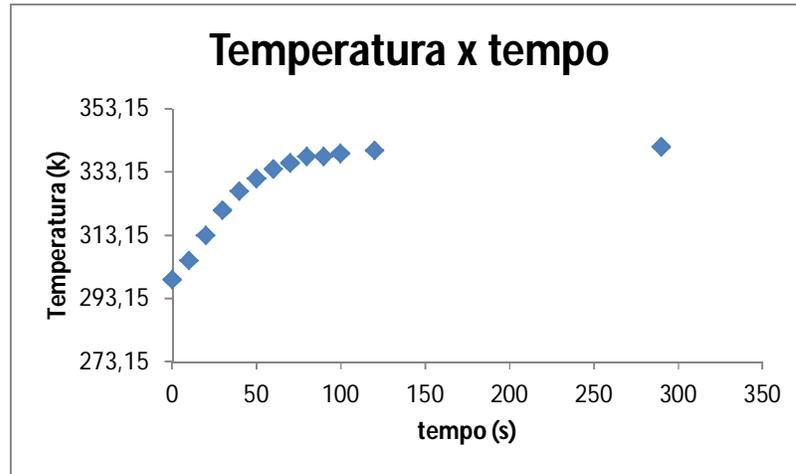


Figura 22 - Perfil da temperatura em função do tempo para o corpo cilíndrico de cobre.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Aplicando-se a regressão linear no gráfico $-\ln\psi$ x t obtêm-se a equação $y = 0,0322x - 0,1483$, sendo que da mesma retiramos o termo “a”, o qual será utilizado em comparação com a parte $\frac{hAs}{\rho Vc}$, derivada da equação $-\ln\psi = \frac{hAs}{\rho Vc}t$, sendo que de tal comparação ($a = \frac{hAs}{\rho Vc}$) retiramos o valor do coeficiente de película (também conhecido como coeficiente de filme), h .

Assim seguem os cálculos abaixo:

$$h = \frac{a \cdot \rho \cdot c_p \cdot V}{A} \text{ (J/(m}^2 \cdot \text{K))} = 1207,8832 \text{ J/Kg} \cdot \text{m}^2$$

Com o valor do coeficiente de película especificado podemos determinar o número de Biot, sendo o mesmo:

$$\text{Bi} = hL_c/k = 0,0329$$

5.4 ESFERA DE ALUMÍNIO

A esfera de alumínio utilizada inicialmente estava a temperatura de 26° C(299,15 K). O diâmetro 0,5080 metros, e assim obtêm-se a área de 0,8103m² e um volume de 0,0686 m³. O comprimento característico (razão entre o volume a área) foi constatado com a medida de 0,0847 m.

O coeficiente de troca térmica (k) encontrado para o alumínio foi de 237 W/m.K, o seu calor específico (cp) utilizado foi de 903 J/Kg.K e densidade (ρ) de 2702 kg/m³(25° C).

Os dados coletados em laboratório para este corpo estão na tabela 3.

Tabela 3 - Dados do corpo esférico de alumínio.

Tc (□C)	Tc(K)	t(s)	$\theta_i(T_i - T_\infty)$	$\theta(T - T_\infty)$	$\Psi (\theta/\theta_i)$	Ln Ψ	-Ln Ψ
26	299,15	0	-42	-42	1	0	0
41	314,15	10	-42	-27	0,642857143	-0,44183	0,441833
57	330,15	20	-42	-11	0,261904762	-1,33977	1,339774
64	337,15	30	-42	-4	0,095238095	-2,35138	2,351375
66	339,15	40	-42	-2	0,047619048	-3,04452	3,044522
67	340,15	110	-42	-1	0,023809524	-3,73767	3,73767
68	341,15	120	-42	0	0	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados acima fornecem os seguintes gráficos:

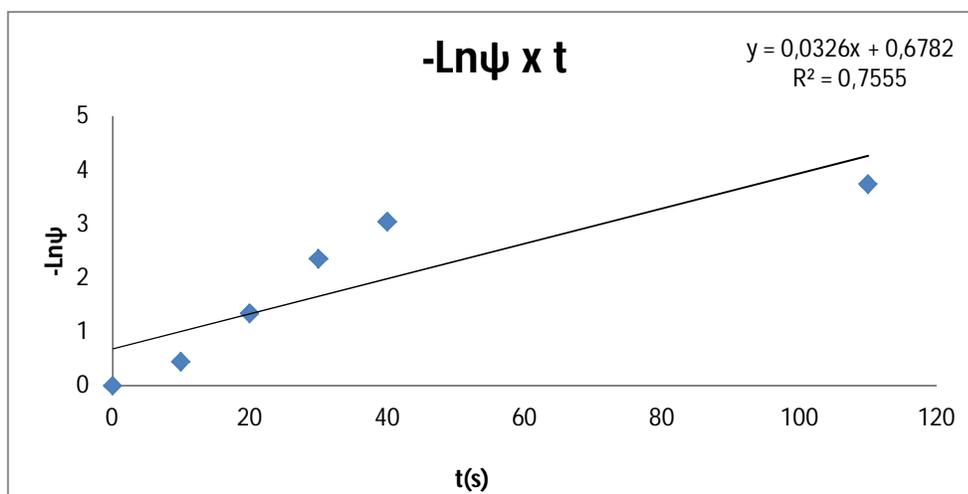


Figura 23 - Gráfico do Logaritmo negativo da razão entre as diferenças de temperatura e temperatura inicial por tempo para o corpo esférico de alumínio.

Fonte: Elaborado pelo autor.

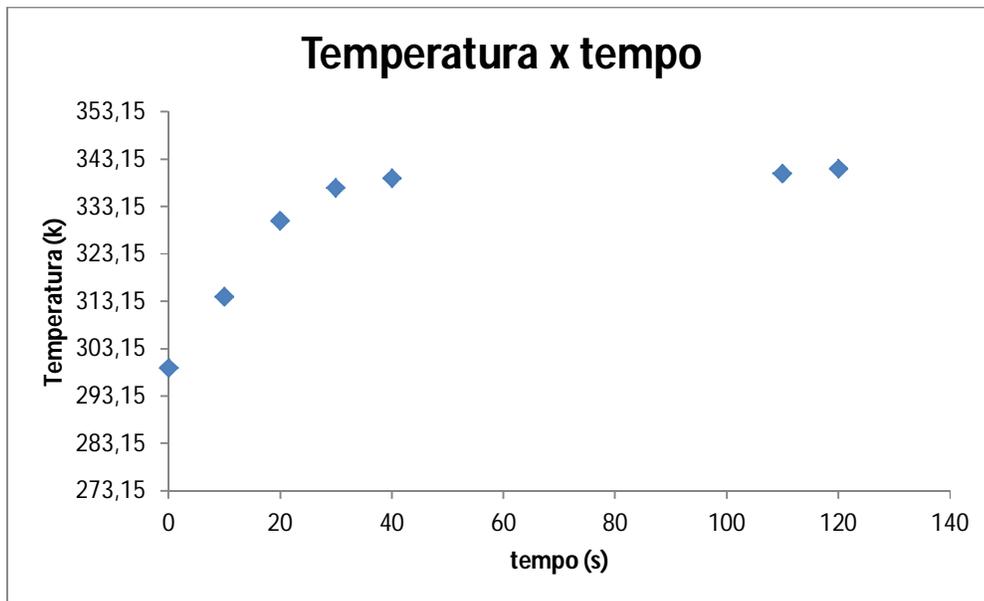


Figura 24 - Perfil da temperatura em função do tempo para o corpo esférico de alumínio.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Aplicando-se a regressão linear no gráfico $-\ln \Psi$ x t obtêm-se a equação $y = 0,0326x + 0,6782$, sendo que da mesma retiramos o termo “a”, o qual será utilizado em comparação com a parte $\frac{hAs}{\rho Vc}$, derivada da equação $-\ln \Psi = \frac{hAs}{\rho Vc} t$, sendo que de tal comparação ($a = \frac{hAs}{\rho Vc}$) retiramos o valor do coeficiente de película (também conhecido como coeficiente de filme), h .

Assim seguem os cálculos abaixo:

$$h = \frac{a \cdot \rho \cdot cp \cdot V}{A} \text{ (J/(m}^2 \cdot \text{K))} = 6734,4659 \text{ J/Kg.m}^2$$

Com o valor do coeficiente de película especificado podemos determinar o número de Biot, sendo o mesmo:

$$Bi = hLc/k = 2,4058$$

5.5 ESFERA DE COBRE

A esfera de cobre utilizada inicialmente estava a temperatura de 26° C (299,15 K). O diâmetro 0,5080 metros, e assim obtêm-se a área de 0,8103m² e um volume de 0,0686 m³. O comprimento característico (razão entre o volume a área) foi constatado com a medida de 0,0847 m.

O coeficiente de troca térmica(k) encontrado para o cobre foi de 401 W/m.K, o seu calor específico (cp) utilizado foi de 385 J/Kg.K e densidade(ρ) de 8933 kg/m³(25° C).

Os dados coletados em laboratório para este estão na tabela 4.

Tabela 4 - Dados do corpo esférico de cobre.

Tc(□C)	Tc(K)	t(s)	$\theta_i(T_i - T_\infty)$	$\theta(T - T_\infty)$	$\Psi(\theta/\theta_i)$	Ln Ψ	-Ln Ψ
26	299,15	0	-42	-42	1	0	0
44	317,15	10	-42	-24	0,571428571	-0,55962	0,559616
60	333,15	20	-42	-8	0,19047619	-1,65823	1,658228
62	335,15	30	-42	-6	0,142857143	-1,94591	1,94591
64	337,15	40	-42	-4	0,095238095	-2,35138	2,351375
65	338,15	60	-42	-3	0,071428571	-2,63906	2,639057
66	339,15	85	-42	-2	0,047619048	-3,04452	3,044522
67	340,15	100	-42	-1	0,023809524	-3,73767	3,73767
68	341,15	130	-42	0	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados acima fornecem os seguintes gráficos:

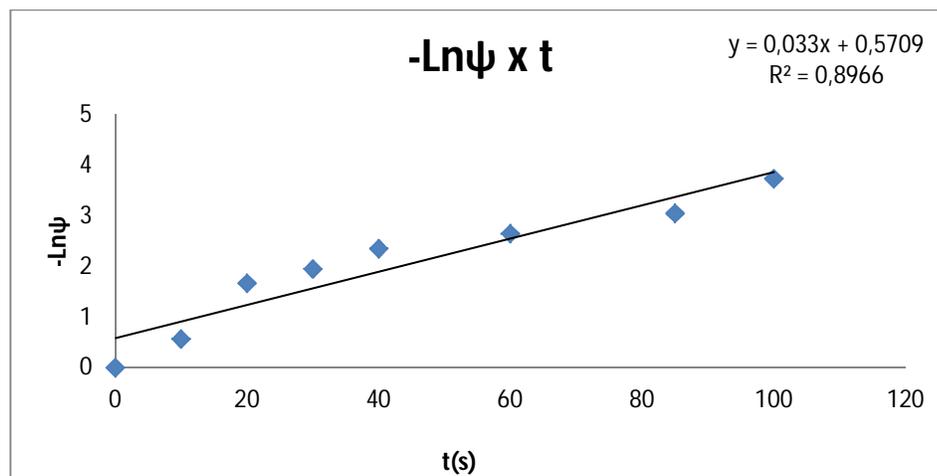


Figura 25 - Gráfico do Logaritmo negativo da razão entre as diferenças de temperatura e temperatura inicial por tempo para o corpo esférico de cobre.

Fonte: Elaborado pelo autor.

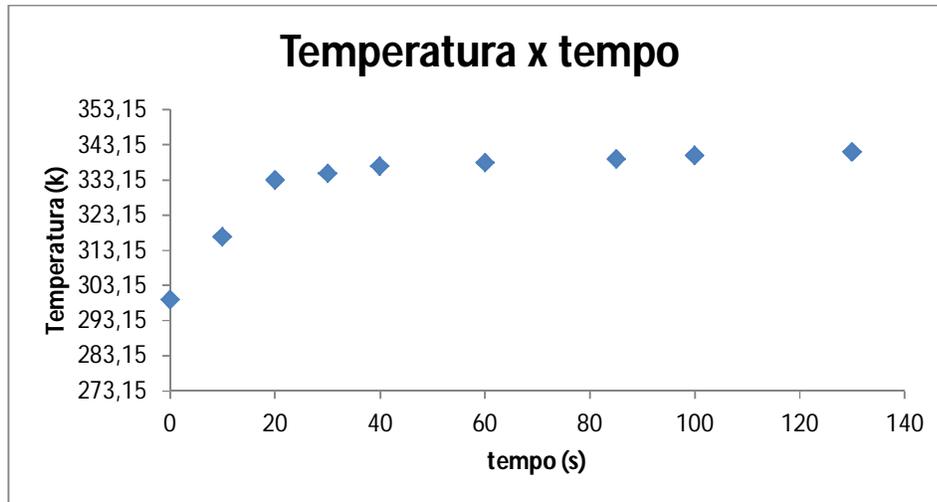


Figura 26 - Perfil da temperatura em função do tempo para o corpo esférico de alumínio.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Aplicando-se a regressão linear no gráfico $-\ln \psi$ x t obtêm-se a equação $y = 0,033x + 0,5709$, sendo que da mesma retiramos o termo “a”, o qual será utilizado em comparação com a parte $\frac{hAs}{\rho Vc}$, derivada da equação $-\ln \psi = \frac{hAs}{\rho Vc} t$, sendo que de tal comparação ($a = \frac{hAs}{\rho Vc}$) retiramos o valor do coeficiente de película (também conhecido como coeficiente de filme), h .

Assim seguem os cálculos abaixo:

$$h = \frac{a \cdot \rho \cdot c_p \cdot V}{A} \text{ (J/(m}^2 \cdot \text{K))} = 9609,1388 \text{ J/Kg.m}^2$$

Com o valor do coeficiente de película especificado podemos determinar o número de Biot, sendo o mesmo:

$$Bi = hLc/k = 2,0289$$

6 DISCUSSÃO

6.1 DISCUSSÃO DA VARIAÇÃO DE FORMA

Conforme os dados expostos na discussão dos resultados, podemos afirmar a diferenciação da condução transiente do calor devido à variação da geometria do material.

Primeiramente consideremos os dados obtidos para os cilindros de cobre e de alumínio.

Obtivemos para ambos os casos valores de Biot abaixo de 1, o que demonstra que a temperatura tende a distribuir-se com maior uniformidade nesses corpos.

Houve variação do número de Biot se compararmos os materiais, porém tal enfoque será dado no próximo tópico.

Para os corpos de forma esférica, também constituídos de alumínio e de cobre, notamos um valor de Biot alto, pois ambos estão acima de 1, assim, a distribuição das temperaturas não é tão boa quanto nos corpos cilíndricos.

Sendo assim podemos afirmar que a variação de geometria influencia no modo em que o calor flui em um corpo e ao seu redor, pois temos a comprovação de tais informações pelo mais importante dado que nos mostra como ocorre a distribuição da temperatura, nos corpos, em regime transiente, o número de Biot.

6.2 DISCUSSÃO DA VARIAÇÃO DE MATERIAL

Os fatores que definem o número de Biot são o coeficiente de película e o coeficiente de troca térmica, assim como o comprimento característico. Porém conforme já exposto, para encontrarmos o coeficiente de película, devemos utilizar alguns parâmetros termodinâmicos específicos de cada material, como calor específico, densidade e condutividade térmica.

Assim é fácil de concluir somente por comparação de parâmetros que haverá variação nos valores obtidos se adotarmos corpos de mesma dimensão e forma, porém constituídos de diferentes materiais.

O experimento realizado anteriormente teve como enfoque real provar por métodos matemáticos que essa variação realmente existe.

Portanto serão utilizados os dados calculados para mostrar de forma clara e sucinta a existência da variação de Biot, e que o material que constitui o corpo é um dos grandes influenciadores dessa variação.

6.3 ESFERA DE ALUMÍNIO X ESFERA DE COBRE/CILINDRO DE ALUMÍNIO X CILINDRO DE COBRE

Para a esfera de cobre e de alumínio, assim como para o cilindro destes metais, temos corpos com as mesmas características dimensionais e geométricas, porém conforme citado anteriormente os dados termodinâmicos são variáveis e tais características diferenciam e interferem nos valores calculados (coeficiente de película e Biot) para esses materiais.

Conforme calculado temos que para a esfera de alumínio o valor de Biot é de 2,4058, já para a esfera de cobre temos o valor de Biot de 2,0289. Para o cilindro de alumínio 0,0503 e para o cilindro de cobre 0,0329.

O princípio para coleta dos dados e a tratativa com os mesmos foi igual para todos os corpos, porém a variação no número de Biot existiu.

As variações do número de Biot para os diferentes corpos de prova são oriundas dos parâmetros termodinâmicos dos materiais, pois como já citado, são específicos de cada corpo e dependem de seus constituintes. Sendo assim a variação nos números de Biot é mais que irrefutável para o caso da comparação exposta acima.

A força motriz é a variação da temperatura. A mesma irá variar dentro dos corpos devido aos choques de elétrons, e em aumento de escala pelo choque dos átomos. Esses choques geram a troca de energia pelo corpo.

Assim os elétrons da parte externa são os que recebem primeiro a energia do fluido que permeia o corpo de prova e começa a ganhar energia e aumentar o seu movimento. Como o espaço para os elétrons é restrito pela camada em que o mesmo está inserido haverá choques entre eles, e esses choques fazem com que o átomo movimente-se dentro do corpo chocando com outro átomo, e assim sucessivamente, distribuindo energia por todo o corpo até que haja o equilíbrio.

Porém o empacotamento dos átomos não é igual, pois cada material possui características específicas (raio atômico, número de elétrons, etc.) e isso influencia de modo direto em como a energia irá fluir pelo corpo. O que podemos justificar pela comparação do número de Biot.

Para os dois corpos de alumínio temos valores de Biot acima dos valores de seus semelhantes (em geometria) feitos de cobre.

Sabe-se também que o cobre tem características condutivas ótimas, seja na condução térmica ou na condução elétrica.

Portanto os valores nos mostram o já esperado, que o cobre é um melhor condutor que o alumínio, e que sua distribuição das temperaturas ocorre de forma melhor, aumentando o rendimento de troca térmica do processo.

7 CONCLUSÃO

A variação de temperatura influencia diretamente os valores termodinâmicos (condutividade térmica, densidade, etc.) dos materiais, pois os mesmos são variáveis conforme temperatura e pressão, como podemos ver nos gráficos da temperatura em função do tempo.

Com isso foi possível obter curvas que demonstram o perfil de distribuição da temperatura ao passar do tempo para cada material.

Para o cobre podemos notar tanto para a geometria cilíndrica quanto para a esférica que nos primeiros instantes a tendência da curva é ser retilínea, depois sofrendo uma curvatura para tender a uniformidade, que é o ponto em que obtêm-se o equilíbrio.

A tendência da curva ser retilínea no primeiro instante está ligado diretamente as características condutivas do material. O cobre é conhecido por suas boas características condutivas e por isso a curva apresenta tal tendência em primeiro instante.

Esmiuçando tudo que foi dito acima, temos que o calor flui mais rapidamente no interior do cobre, assim a temperatura tende a subir com maior facilidade dando a característica retilínea nos primeiros instantes de sua curva.

Já para o alumínio notamos uma tendência um pouco diferente: nos primeiros pontos temos uma curva crescente, até que a mesma aproxime-se da temperatura de equilíbrio, onde adquire caráter retilíneo.

Portanto, fica claro apenas pelo gráfico de temperatura em função do tempo que é possível analisar a característica condutiva dos materiais e determinar qual o melhor condutor qualitativamente por meio de gráfico.

Também com esse trabalho foi possível analisar como as características, sejam elas geométricas ou termodinâmicas, dos materiais influenciam na troca térmica.

O coeficiente de película é encontrado pelo auxílio gráfico, sendo que este é um dos métodos de maior facilidade e rapidez, devido a grande ajuda tecnológica que existe. O mesmo é razão da multiplicação do coeficiente angular, do peso específico do material (densidade), do calor específico e do volume sendo os tal produto dividido pela área.

Como haviam 4 corpos de prova, sendo com 2 geometrias diferentes e dois tipos de materiais diferentes, esperava-se encontrar 4 valores diferentes do coeficiente de película, sendo que o mesmo aconteceu.

Agora lembrando que Biot é a divisão do produto do coeficiente de película e do comprimento superficial divididos pela condutividade térmica, podemos concluir que também serão obtidos 4 valores diferentes de Biot.

E conforme exposto no corpo deste trabalho, foram encontrados 4 valores diferentes de Biot, comprovando assim o esperado e conseguindo-se assim atingir os objetivos previamente propostos.

REFERÊNCIAS

CAO, E.. **Heat Transfer in process engineering**. San Francisco: McGraw Hill, 2010.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de Calor e Massa**. 3. ed. SP: McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda, 2009.

DEQ/UFSCAR. **Manual de operação conjunto didático experimental**: determinação do coeficiente de transferência de calor em regime transiente. São Carlos, SP, [200-?]. 11p.

EQUIBRÁS. Fábrica de bombas. São José dos Campos, [200-?]. Apresentação de dados técnicos de bombas e equipamentos voltados para hidráulica. Disponível em: <<http://www.equibras.com/php/navegacao.php?chave=p-circuladores>>. Acesso em: 20 out. 2012.

FISBHEN, M. **Transmissão de calor**. Rio de Janeiro: 2011. Resumo de aula.

GÜTS, S.; PAULO, V. de. **Instrumentação em ciências térmicas**. Florianópolis, SC, 1998. 37p. Apostila. Disponível em <<http://srv.emc.ufsc.br/labtermo/publica/apostInstrum.pdf>>. Acesso em 15 out. 2012.

INCROPERA, F.P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

JOAQUIM ALVES GASPAS. Portugal, 2011. Ilustração de um paquímetro. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Vernier_caliper.svg&page=1>. Acesso em: 15 out. 2012.

KREITH, F. B., M.S. **Princípios de transferência de calor**. 6. ed. São Paulo: Thonson, 2003.

LEE, J. D. **Química inorgânica não tão concisa**. São Paulo, Edgard Blucher, 1999.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. Rio de Janeiro, LTC, 2010.

ROJAS, C. A. O cobre e sua obtenção. **UFPR**, 2004. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/CarlosRojas.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2012.

SALATIEL VENANCIO. Notas de aula. UFCG, Campina Grande, 2009. Texto abordando bombas centrífugas. Disponível em:
< <http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/Bomb02.html?submit=Continuar>> . Acesso em: 15 out. 2012.

SERWAY, R. A.; JEWETT JUNIOR, J. W. **Princípios de Física: eletromagnetismo**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

SHREVE, N.R.; JUNIOR, B.A.J. **Indústria de Processo Químicos**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Koogan S.A., 1997.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

TERMÔMETRO. c2001-2012. Arquivos escolares on-line. Disponível em: <
<http://www.colegioweb.com.br/fisica/termometro.html>>. Acesso em: 15 out. 2012.

WELTY, F.R. et al. **Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass transfer**. 5.ed. Danver: Wiley, 2008.