

XXIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 11 a 15/09/2017 – Rio Grande - RS

ESTUDO EXPERIMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO: DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE EM MATERIAIS METÁLICOS

Vanessa Fonseca dos Santos

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Rodovia Presidente Dutra Km 298 (sentido RJ-SP) – Pólo Industrial – Resende – RJ – CEP: 27.537-000

vanessafonseca.x@hotmail.com

RESUMO: O objetivo deste trabalho é realizar uma experimentação, destinada ao estudo prático do assunto por alunos em laboratório, sobre a transferência de calor por condução e determinação dos coeficientes de condutividade de três materiais metálicos condutores (alumínio, latão e aço) e sua influência no fluxo de calor. Esses corpos de prova cilíndricos são aquecidos por banho de água em um recipiente adiabático, adquiridas as temperaturas por termopares sendo feita a análise, o monitoramento e controle em tempo real desses dados através de uma placa de aquisição. Além da condução, a transferência de calor por convecção também é atuante nas amostras devido parte delas possuir um revestimento adiabático e outra, exposta, imersa no banho de água no qual se designa como fonte quente de calor. Da convecção natural em cilindros verticais, o coeficiente de transferência de calor e, por conseguinte o fluxo de calor fornecido é determinado em função dos parâmetros adimensionais correlacionados às propriedades hidrodinâmicas e térmicas da água como o número de Rayleigh e Nusselt.

Palavras-Chave: transferência de calor; coeficiente de condutividade; convecção natural

ABSTRACT: The objective of this work is to perform a practical experimentation study by students in the laboratory on the determination of the conductivity coefficients of three conductive metal materials (aluminum, brass and steel) and their influence on the heat flux. These cylindrical proof bodies are heated by a water bath in an adiabatic vessel, the thermocouple temperatures being acquired and the analysis, monitoring and real time control of these data through an acquisition plate. In addition to conduction, the heat transfer by convection is also active in the samples because some of them have an adiabatic coating and another, exposed, immersed in the water bath in which it is designated as hot source of heat. From the natural convection in vertical cylinders, the heat transfer coefficient and, therefore, the heat flux supplied is determined as a function of the dimensionless parameters correlated to the hydrodynamic and thermal properties of the water as the Rayleigh and Nusselt number.

Keywords: heat transfer; coefficient of conductivity; natural convection

INTRODUÇÃO

A expansão de novas tecnologias e melhorias nasce em função de uma problemática a ser suprida e o caminho para que isso ocorra é através de estudos fundamentados em teorias e métodos científicos conhecidos e desenvolvimento de técnicas experimentais empíricas. No que diz respeito a materiais e suas propriedades, são inúmeras as pesquisas realizadas para conhecimento e caracterização desses materiais para que sejam, adequadamente, selecionados em função da aplicabilidade. Para a determinação de propriedades físico-químicas de um material por meios experimentais é essencial que seja feito um padrão de análise e que sejam seguidas as normas técnicas referentes a equipamentos e ferramentas, mesmo que se trate de um método simples. A condutividade térmica (k) é uma das propriedades relevantes a se considerar, pois ela diz a taxa na qual a energia é transferida através de um material sólido por meio de difusão térmica, propagação feita por contato entre moléculas (INCROPERA, 2008).

Dessa forma, visando esses aspectos, é que se originou este experimento a fim de estudar o fenômeno da transferência de calor por condução, na condição de regime permanente e fluxo unidimensional, em corpos de prova de diferentes materiais conhecidos e também determinar o coeficiente de condutividade dos mesmos. Através da análise das temperaturas adquiridas entre as fontes quente e fria (as extremidades das amostras), é possível fazer o estudo das variáveis envolvidas no processo e entender como elas influenciam no sistema. Outra intenção na realização desse trabalho é destina-lo às aulas práticas da disciplina de Fenômenos de Transporte do curso de Engenharia Mecânica, que

são desenvolvidas no Laboratório de Motores, Hidráulica e Pneumática da Faculdade de Tecnologia (FAT-UERJ). Essa iniciativa é muito importante, pois dá aos alunos uma melhor compreensão do fenômeno físico e também uma visão mais prática da engenharia, além de motivá-los e despertar o interesse pela área.

Pode ser dada a característica de condutor ou isolante térmico para um material em função da sua condutividade térmica. Valores de condutividade mais baixos são denominados isolantes como, por exemplo, o poliestireno expandido com 0,04 W/mK e valores altos como o do cobre de 400 W/mK. Os materiais utilizados no experimento são classificados como condutores térmicos havendo entre eles variação na condutividade e consequentemente no fluxo de transferência de calor.

Segundo Incropera (2008, p.2), a transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido à diferença de temperatura no espaço. A fonte de calor do presente experimento é obtida através do banho de água no qual uma das extremidades dessas amostras está imersa. Deste modo, conceitos de convecção natural em cilindros verticais também foram necessários para a determinação dos coeficientes de condutividade.

METODOLOGIA

Fundamentação teórica

Existem três formas básicas de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Porém, para este experimento, a ênfase de estudo foi a transferência de calor por condução unidimensional em regime permanente, sendo necessário também, aprofundarmos os conceitos da transferência de calor por convecção natural em cilindros verticais.

Condução térmica

É o transporte de energia térmica por difusão através da interação entre as moléculas existentes em um meio participante e havendo um gradiente de temperatura, permitindo que essa energia seja transferida das partículas mais energéticas (maior temperatura) para as partículas menos energéticas (menor temperatura).

Para quantificar esse fenômeno a lei de Fourier é aplicada, conforme a Eq. (1), para determinar a quantidade de calor transferida por unidade de tempo, sendo A área da seção transversal, ΔT a variação de temperatura e L distância entre as fontes quente e fria.

$$q_c = -k A \left(\frac{\Delta T}{L} \right) \quad (1)$$

A constante de proporcionalidade (k) é a condutividade térmica que pode ser definida como a habilidade de um material em conduzir calor. É uma característica específica que depende tanto da pureza (composição química) como da temperatura na qual o material se encontra.

Convecção natural em cilindros verticais

A convecção é a junção dos mecanismos de difusão térmica e advecção, ou seja, ocorre a transferência de calor em um meio a nível molecular seguido da movimentação de um fluido sobre a superfície de contato do material. Essa interação fluido-superfície gera uma região chamada de camada limite, no qual partículas do fluido aderem à superfície de forma tal que, interfere na velocidade de escoamento do fluido (camada limite hidrodinâmica) e temperatura do fluido (camada limite térmica) (Passos, C.J., 2010).

As propriedades hidrodinâmicas do fluido e seus parâmetros também são importantes e influenciam diretamente na convecção como um todo, pois é em função de algumas dessas propriedades que se determina o coeficiente de transferência de calor ou película (h) para então calcular a taxa de transferência de calor por convecção aplicando a lei de resfriamento de Newton, conforme a Eq. (2), sendo A área da superfície, T_s temperatura da superfície e T_∞ a temperatura do fluido:

$$q_{cv} = h A (T_\infty - T_s) \quad (2)$$

Segundo J. P. Holman (1983), a convecção natural ou livre é o movimento do fluido devido à diferença de densidade provocada pelo processo de aquecimento, ou seja, o resultado das forças de empuxo impostas ao fluido sendo ele um gás ou um líquido. Por existir muitas propriedades e grandezas físicas envolvidas na convecção, variáveis adimensionais são utilizadas, entre elas: número de Grashof (Gr), que representa a relação entre as forças viscosas e de empuxo no fluido, o número de Prandtl (Pr) que expressa a relação da quantidade de movimento do fluido e a

difusividade térmica e o número de Nusselt (Nu) sendo a medida da relação entre a transferência de calor do fluido por convecção e por condução referente a superfície. O produto entre Grashof e Prandtl denomina-se número de Rayleigh (Ra).

Para realização dos cálculos das variáveis, as propriedades correspondentes são definidas em função da temperatura de película T_f , conforme a Eq. (3) demonstrada:

$$T_f = \frac{T_\infty + T_s}{2} \quad (3)$$

Considerando um sistema com fluxo de calor constante e superfícies de contato isotérmicas, a caracterização do escoamento do fluido pode ser dada através do valor do número de Rayleigh (Ra), sendo escoamento laminar para $Ra < 10^9$ e escoamento turbulento para $Ra > 10^9$. A partir disso determina-se o número de Nusselt e o coeficiente de transferência de calor (h) por correlações empíricas propostas por Hilpert (Holman, 1983) apresentadas nas Eq. (4) e (5) respectivamente.

$$Nu = C (GfPr)^m \quad (4)$$

$$h = \frac{Nu k}{D} \quad (5)$$

A Tabela 1 apresenta os valores das constantes C e m utilizadas na Eq. (4) em função de Ra e da geometria da superfície.

Tabela 1. Constantes da Eq. (4) para superfícies isotérmicas (Holman, 1983)

Geometria	Número de Rayleigh	C	m
Cilindros e planos verticais	$10^4 - 10^9$	0,59	1/4
	$10^9 - 10^{13}$	0,021	2/5
	$10^9 - 10^{13}$	0,10	1/3

Com o coeficiente de película determinado é possível então calcular a transferência de calor por convecção aplicando a Lei do resfriamento de Newton, Eq. (2). No Experimento, o q_{cv} é a quantidade de calor fornecida do banho (fonte quente) para as amostras e considerando a condição de contorno de balanço térmico, o fluxo de calor que entra por convecção é igual ao fluxo de calor por meio da condução no material em regime permanente e fluxo unidimensional, podemos dizer que: $q_{cv} = q_c$.

Descrição do experimento

O experimento é um sistema adiabático que consiste em um recipiente de dimensões 150 mm x 470 mm x 340 mm que é preenchido com 11 litros de água, isolado com borracha, poliuretano expandido e madeira nas laterais externas e com isopor na parte superior externa (tampa). Possui 03 corpos de prova (alumínio, aço e latão), fixados na tampa, com 200 mm de comprimento e 20 mm de diâmetro sendo 70 mm (partindo da extremidade inferior) imerso em banho de água e 130 mm fora do banho e isolados termicamente com manta asfáltica para garantir apenas o fluxo de calor axial. Um Ebulidor (resistência elétrica) de 500 W locado no centro do recipiente é responsável por fornecer calor ao banho de água, no entanto, a potência desejada é previamente calculada em função da temperatura média do banho e controlada por um Dimmer que mantém a corrente no valor de 0,8 A, resultando em 88 W. A regulação do Dimmer para gerar a corrente desejada foi feita através da medição dessa corrente por um alicate amperímetro. Foram instrumentados 11 termopares tipo K baioneta com buçim em pontos pré-definidos para aquisição de temperatura, sendo em cada corpo de prova: 02 termopares locados no centro a 20 mm da extremidade superior e 10 mm da extremidade inferior, 01 termopar fixado a uma distância de 10 mm do centro e em posição paralela, 01 termopar para monitorar a temperatura do banho e 01 termopar para monitorar a temperatura ambiente.

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam um desenho esquemático, o experimento em bancada e a amostra de latão utilizada, respectivamente.

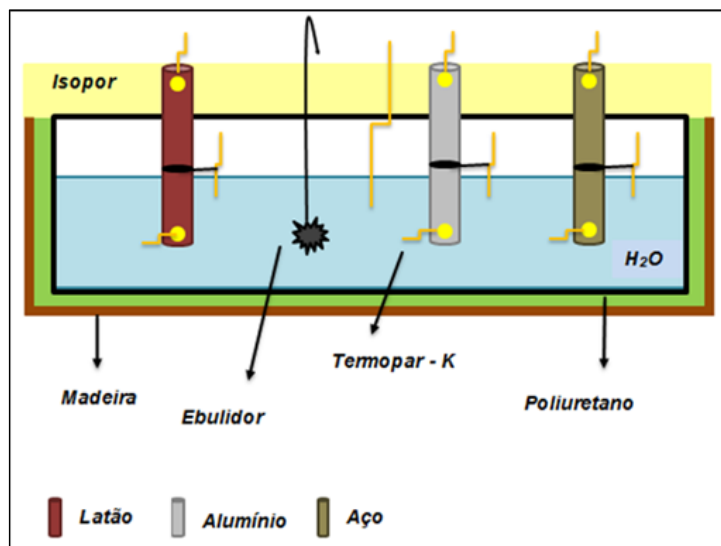


Figura 1. Desenho esquemático do experimento



Figura 2. Experimento em bancada



Figura 3. Corpo de prova - Latão

Toda a aquisição e monitoramento dos dados de temperatura foi realizada através de uma placa de aquisição de dados Lynx AqDados, sendo esta, configurada de acordo com o relatório de calibração de fábrica e parametrizada conforme recomendação do fabricante para aquisição de temperatura. Os termopares foram cuidadosamente verificados quanto ao estado de conservação e uso, a instalação correta de conectores macho e fêmea, e ligação dos fios de compensação no borne da placa com a polaridade certa.

Metodologia aplicada

Inicialmente, o recipiente é preenchido com 11 litros de água sendo aquecida a temperatura de 50°C. Verifica-se se os termopares e a placa de aquisição estão em perfeitas condições e se a leitura de dados está coerente. O ebulidor (resistência térmica) então é ligado para manter o banho aquecido. Entretanto, durante o processo de transferência de calor, pode-se perceber que a temperatura do banho não permaneceu constante e sim aumentou gradativamente na mesma proporção e, conseqüentemente, as temperaturas relativas ao corpo de prova também. Isso se dá devido a água possuir uma capacidade térmica (C) e calor específico (c_p) consideráveis. Dessa forma, o ponto de estabilidade térmica

do banho se deu em função de seu gradiente de temperatura constante a cada intervalo de coleta de dados. Consequentemente, os gradientes de temperatura referentes aos corpos de prova também sofreram a respectiva oscilação na mesma proporção.

A aquisição e análise de dados foi realizada através do software da placa de aquisição Lynx AqDados, que possibilitou a comparação e controle das temperaturas em tempo real e o manuseio dos dados após o término da aquisição através de ferramentas disponíveis do próprio software.

De cada conjunto de dados de temperatura referente às amostras determinou-se, a partir do ponto de estabilidade térmica do banho, a média de todos os valores correspondentes após o banho de água atingir um gradiente de temperatura constante. Algumas considerações importantes foram feitas e a partir delas deu-se início aos cálculos: sistema adiabático, superfície de contato isotérmica, fluido incompressível e fluxo de calor constante.

Sendo as propriedades do fluido dependentes da temperatura a qual se encontra, é necessário utilizar um valor de temperatura de referência chamada de temperatura de película T_f . A Tabela 2 apresenta os valores das propriedades da água em função da temperatura de película. Para o experimento foi utilizado $T_f = 50^\circ\text{C}$ e os valores correspondentes, de acordo com a Tab.(2) são:

- Calor específico: $c_p = 4,178 \text{ kJ/Kg } ^\circ\text{C}$
- Massa específica: $\rho = 988,2 \text{ kg/m}^3$
- Viscosidade dinâmica: $\mu = 0,000552 \text{ kg/m.s}$
- Número de Prandtl: $Pr = 3,57$
- Coeficiente de condutividade: $k = 0,645 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
- Fator: $g\beta\rho^2c_p/\mu k = 5,05 \times 10^{10} \text{ 1/m}^3 ^\circ\text{C}$

Tabela 2. Propriedades da água (Holman, 1983)

$^\circ\text{C}$	c_p $\text{kJ/Kg } ^\circ\text{C}$	ρ kg/m^3	μ kg/m.s	k $\text{W/m } ^\circ\text{C}$	Pr	$g\beta\rho^2c_p/\mu k$ $1/\text{m}^3 ^\circ\text{C}$
0	4,225	999,8	0,00179	0,566	13,25	$1,91 \times 10^9$
4,44	4,208	999,8	1,55	0,575	11,35	$6,34 \times 10^9$
10	4,195	999,2	1,31	0,585	9,40	$1,08 \times 10^{10}$
15,56	4,186	999,6	1,12	0,595	7,88	$1,46 \times 10^{10}$
21,11	4,179	997,4	0,00098	0,604	6,78	$1,91 \times 10^{10}$
26,67	4,179	995,8	8,6	0,614	5,85	$2,48 \times 10^{10}$
32,22	4,174	994,9	7,65	0,623	5,12	$3,3 \times 10^{10}$
37,78	4,174	993,0	6,82	0,630	4,53	$4,19 \times 10^{10}$
43,33	4,174	990,6	6,16	0,637	4,04	$4,89 \times 10^{10}$
48,89	4,174	988,8	5,62	0,644	3,64	$5,66 \times 10^{10}$
54,44	4,179	985,7	5,13	0,649	3,30	$6,48 \times 10^{10}$
60	4,179	983,3	4,71	0,654	3,01	$7,62 \times 10^{10}$

Com as propriedades corretamente determinadas a classificação do tipo de escoamento da água do banho pode ser feita através do número de Rayleigh (Ra). Conforme apresentado na Eq. (7), o Ra também depende da variação do gradiente de temperatura e diâmetro da amostra, entretanto, o valor de ΔT irá variar de acordo com o material analisado logo o número de Rayleigh e posteriores cálculos foram realizados separadamente para cada corpo de prova.

$$Ra = \frac{g \beta \rho^2 c_p \Delta T D^3}{\mu k} \quad (7)$$

Para os três materiais (alumínio, aço e latão) a ordem de grandeza do valor de Ra foi menor que 10^9 , assim diz-se que o escoamento é laminar. Sendo escoamento laminar o número de Nusselt e o coeficiente de transferência de calor podem ser calculados pela Eq. (4) e (5), respectivamente. Por conseguinte, determina-se o fluxo de calor por convecção e, sabendo que $q_{cv} = q_c$, pode-se enfim calcular o coeficiente de condutividade (k).

Algumas observações particulares referentes à aplicação da lei de Fourier e da lei de resfriamento de Newton em função da metodologia desenvolvida foram feitas:

- O valor de L na Eq. (1) é considerado a partir da posição dos termopares nas amostras. Cabe lembrar que a temperatura da superfície imersa no banho é considerada constante e a superfície restante de cada cilindro está isolada (adiabático), exceto a face da seção transversal da extremidade superior.

- A altura considerada na área da superfície de transferência de calor por convecção, da Eq. (2), é exatamente a altura no qual a extremidade inferior do corpo de prova está imersa no banho de água.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados e resultados gerados pela aplicação do método desenvolvido foram satisfatórios. A relação de valores entre as temperaturas atenderam o sentido do transporte de energia, ou seja, a transferência de calor dá-se da região de maior temperatura para a de menor temperatura, constatando assim, que o $\Delta T_{\text{banho}} > \Delta T_{\text{inferior da amostra}} > \Delta T_{\text{superior da amostra}}$. A proporção química exata da liga metálica das amostras analisadas é desconhecida e para atestar se os valores de condutividade encontrados estavam coerentes foi utilizada a tabela de propriedades de metais, descrita segundo J.P. Holman (1983), que apresenta valores de condutividade térmica em função da temperatura na qual está submetido o material e da composição da liga, podendo assim realizar uma análise comparativa destes com o valor obtido experimentalmente. A Figura 4 apresenta os valores de k calculados. O intervalo de valores admissíveis para o coeficiente de condutividade de cada material (Holman, 1983):

- Alumínio: 137 – 206 W/m °C
- Latão: 22,2 – 128 W/m °C
- Aço: 43 – 73 W/m °C

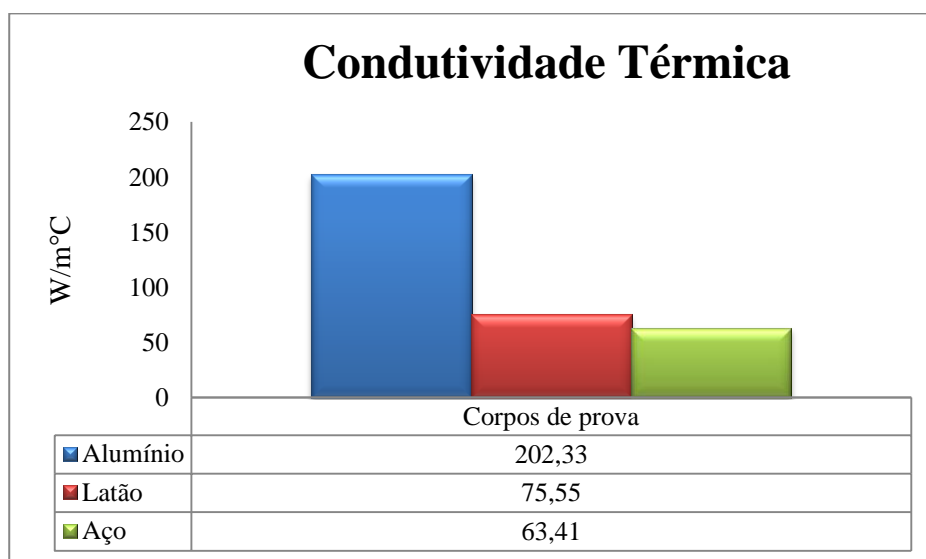


Figura 4. Gráfico comparativo dos resultados da condutividade térmica dos materiais analisados

A tabela 3 mostra os valores analíticos encontrados através do método aplicado. Pode-se perceber também que os valores dos parâmetros em questão respeitam a proporcionalidade apresentada pelas equações correspondentes e também entre si.

Tabela 3. Valores dos parâmetros calculados

Corpo de prova	Ra	Nu	$h - \text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$q_{cv} - \text{W}$
Alumínio	$6,81 \times 10^5$	16,95	364,49	1,23
Latão	$5,91 \times 10^6$	29,10	268,13	0,60
Aço	$4,15 \times 10^6$	26,64	245,47	0,38

Geralmente, quando se trata de geração de calor, utilizam-se dispositivos que geram calor por eletricidade (resistência elétrica) e têm uma superfície de contato condutora e geometricamente adequada para transportar essa energia. No experimento, o banho de água foi considerado a fonte quente de calor para as amostras, sendo esta aquecida



XXIV CREEM
Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica



**Universidade Federal
do Rio Grande**



INSTITUTO FEDERAL
RIO GRANDE DO SUL
Campus Rio Grande

pelo ebulidor. Porém a água é uma substância que possui capacidade térmica e calor específico relativamente alto quando comparada com o material das amostras, por exemplo, dificultando então a transferência de calor e também na dissipação do calor no próprio fluido (difusividade térmica). Devido a isso, foi necessário um tempo maior para realização de todo o experimento, pois das temperaturas aquisitadas, são somente válidas para cálculos a partir do momento no qual o banho atinge seu ponto de estabilidade térmica. A duração total do experimento foi de aproximadamente 2 horas.

A tampa do recipiente possui cinco locais disponíveis para fixação de corpos de prova em experimentação particular ou simultânea. Até então foram estudados somente esses três materiais, mas outras análises com materiais isolantes como madeira e nylon, podem ser feitas e não somente isso, mas também um balanço de energia definindo um volume de controle mais amplo. Um dispositivo para homogeneizar a temperatura do banho de água seria uma maneira alternativa de facilitar e otimizar o tempo para atingir a estabilização térmica, ou então, dispor de equipamentos e ferramentas mais funcionais para isso.

CONCLUSÃO

O experimento possibilitou o estudo geral do fenômeno da transferência de calor por condução na condição de regime permanente e fluxo unidimensional e, convenientemente, a convecção natural em cilindros verticais, tendo como objetivo principal, a determinação da condutividade térmica de diferentes materiais metálicos. As correlações adimensionais e as propriedades hidrodinâmicas relacionadas existentes na convecção natural foram importantes para o cálculo do coeficiente de película do banho e do fluxo de calor fornecido para cada amostra.

A metodologia desenvolvida e seus resultados obtidos foram atestados e estão em concordância com os conceitos e dados descritos na literatura de referência. O uso de um banho de água como fonte quente calor, do ponto de vista funcional, não favoreceu o estudo devido as suas características térmicas serem negativas para desempenhar um controle térmico preciso. Em contrapartida, proporcionou ao experimento uma análise e fundamentação teórica mais minuciosa. Das ferramentas e equipamentos utilizados, a placa de aquisição e os termopares foram essenciais para obtenção dos dados de temperatura do experimento e também para análise destes.

Em suma, o presente trabalho atingiu as expectativas de forma satisfatória. Entretanto, pode ser aproveitado para estudos posteriores, partindo de um volume de controle maior e também agregar novas ideias e conceitos de diferentes vertentes de estudo envolvendo tanto a transferência de calor quanto a mecânica dos fluidos.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos ao professor e coordenador do Laboratório de Motores, Hidráulica e Pneumática Luiz Carlos Cordeiro Júnior pela confiança e incentivo à realização deste trabalho, por todo aprendizado e oportunidades proporcionadas por meio deste; ao professor e coordenador do Centro de Fontes Renováveis de Energia (CFRE) Newton Leite pelo apoio; à KLL Equipamentos para Transporte pela doação dos materiais e componentes viabilizando o desenvolvimento deste trabalho; à Faculdade de Tecnologia (FAT-UERJ) pelo conhecimento acadêmico e aos meus pais por acreditarem em mim, pelo carinho e todo investimento em minha formação profissional/acadêmica.

REFERÊNCIAS

- Holman, J.P., 1983, “Transferência de Calor”, Editora McGraw-Hill Ltda, São Paulo, Brasil.
- Incropera, F.P. [et al.], De Witt, D. P., Bergman, T.L., Lavine, A.S., 2008, “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”, Ed. LTC, 6ª ed., Rio de Janeiro, Brasil.
- Incropera, F.P. [et al.], De Witt, D. P., Bergman, T.L., Lavine, A.S., 2008, “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”, Ed. LTC, 6ª ed., Rio de Janeiro, Brasil, 2 p.
- Passos, C.J., 2010, “O conceito de camada limite: uma revisão crítica de Livros-texto de transferência de calor”, VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), 7ª ed., Paraíba, Brasil.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

O autor é o único responsável pelo material impresso contido neste artigo.