

VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS TÉRMICOS EM DIFERENTES MATERIAIS

Igor Moraes Bezerra Calixto^{*1}, *Yanne Katiussy Pereira Gurgel Aum*¹, *Luyara de Almeida Cavalcante*¹, *Yan Monteiro Silva*¹

RESUMO

CALIXTO, I.M.B.; AUM, Y.K.P.G.; CAVALCANTE, L.A.; SILVA, Y.M. Verificação Experimental de parâmetros térmicos em diferentes materiais. **Perspectivas Online: Exatas & Engenharia**, v. 09, n. 24, p. 57 - 67, 2019.

Neste estudo da condução térmica em aço e alumínio, a temperatura em diferentes pontos ao longo de duas seções, uma de aquecimento e outra de resfriamento, foi obtida para determinar variáveis físicas do sistema, tais como gradiente térmico e condutividade. Os experimentos foram

realizados no Módulo DIDATECH TE6A. O fluxo térmico para o alumínio foi maior do que para o aço. Além disso, o perfil experimental de temperatura para o alumínio foi próximo ao previsto teoricamente.

Palavras-chave: Condução térmica; Perfil de temperatura; Gradiente térmico.

ABSTRACT

In this study of the thermal conduction in steel and aluminum, the temperature in different points along two sections, one of heating and other of cooling, were obtained to determine physical variables of the system, such as conductivity and thermal gradient.

The experiments were carried out in DIDATECH TE6A Module. The thermal flux for aluminum was greater than for steel. In addition, the experimental temperature profile for aluminum was close to that predicted theoretically.

Keywords: Thermal conduction; Temperature profile; Thermal gradient.

¹Universidade Federal do Amazonas, Av. General Rodrigo Octavio Jordão Ramos, 1200, Coroado I, Manaus, AM, CEP: 69067-005, Brasil.

(*) e-mail: igormbcaxto@hotmail.com

Data de recebimento: 03/04/2019. Aceito para publicação: 28/05/2019

1. INTRODUÇÃO

Um procedimento experimental comum para discentes da disciplina de Fenômenos de Transportes Experimental é a verificação da condução térmica linear em diferentes materiais, na qual pode-se relacionar o fluxo térmico ao gradiente de temperatura, às dimensões do meio e à condutividade térmica pela lei de Fourier. A transmissão de calor por condução ocorre de forma mais expressiva quando os materiais são condutores térmicos, tais como os metais e semimetais (INCROPERA & DEWITT, 2008).

Ademais, as dimensões do meio influenciam na capacidade do transporte de calor de um meio para outro, sendo inversamente proporcional à espessura do material (FOUST *et al.*, 2012). Outra variável importante para que o meio transmita calor por condução é o gradiente térmico que é a força motriz para a condução térmica (ÇENGEL & GHAJAR, 2012).

Um dos equipamentos convencionalmente empregados para verificação da lei de Fourier é constituído de um corpo cilíndrico distribuído em seção de aquecimento e seção de resfriamento com termopares acoplados que são responsáveis pela medição da temperatura em toda a região de transporte térmico. Este cilindro de condução pode apresentar também uma seção intermediária constituída normalmente de materiais metálicos ou semimetálicos (DIDATECH, 2018).

A propagação do calor é realizada por condução quando o calor passa da região mais quente para a mais fria de partícula em partícula. Na propagação por condução, as partículas do meio onde o calor se propaga permanecem estacionárias. O processo estacionário por sua vez ocorre quando as temperaturas das partículas do meio onde o calor se propaga não variam em função do tempo (INCROPERA & DEWITT, 2008).

Para ocorrer o processo de transferência de calor, é necessário que exista uma diferença de temperatura chamada gradiente térmico. O gradiente entre dois pontos é a taxa de variação da temperatura em relação à distância. A figura 1 considera “ e ” a espessura da parede cuja face quente está a uma temperatura T_1 e a face fria a uma temperatura T_2 .

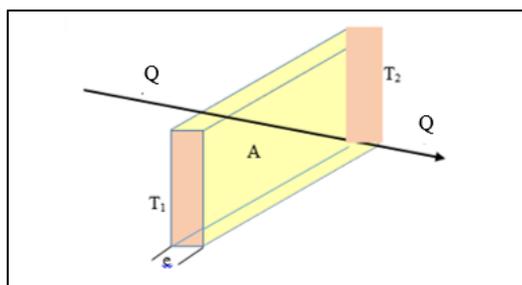


Figura 1: Esquema simplificado de um processo de condução térmica

O gradiente de temperatura na parede na direção de propagação do calor é dado pela diferença entre T_1 e T_2 . Sabe-se também que a condutividade térmica do material é um parâmetro muito importante no processo de condução uma vez que materiais mais condutores têm maior facilidade de propagar calor para outro sistema. Além disso, têm-se que a espessura é um fator de resistência à transferência térmica (FOUST *et al.*, 2012).

A lei de Fourier, expressa pela equação 1, é o modelo que descreve como o fluxo de calor é interdependente do gradiente de temperatura, das dimensões do meio (ou material) e da condutividade do material (GEANKOPLIS, 2003).

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Na qual Q é o fluxo de calor, k a condutividade térmica, A é a área de troca térmica e $\frac{dT}{dx}$ a taxa de variação da temperatura pela espessura do material na direção do fluxo térmico.

Assim, o estudo de condução térmica linear em seção de latão e alumínio apresentou como objetivo a verificação de como parâmetros térmicos e os tipos de materiais utilizados influenciam no processo de troca de calor do sistema avaliado.

2. METODOLOGIA

O aparato experimental utilizado para verificação do fenômeno de condução em diferentes tipos de materiais foi a bancada TE6A, do módulo DIDATECH, conforme mostrado na figura 2.

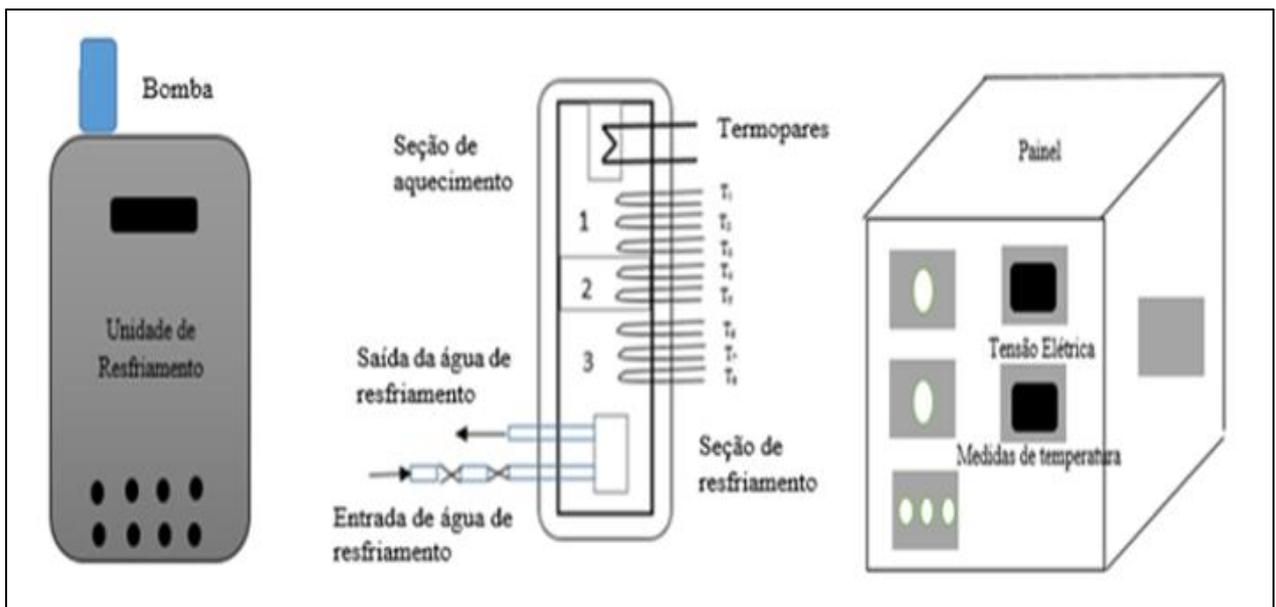


Figura 2: Módulo de bancada TE6A da DIDATECH

O aparato é constituído por um circuito de aquecimento, um de resfriamento e um módulo de aquisição e controle. No circuito de aquecimento, há uma resistência que pode ser acionada e controlada manualmente via módulo de aquisição e controle através da escolha de um valor de tensão. Utilizou-se a seção de latão com seção intermediária de aço ou alumínio tendo três termopares acoplados na seção de aquecimento e resfriamento e dois termopares na seção intermediária. Uma pasta térmica de óxido de silício foi utilizada para aumento da transferência térmica no meio de propagação entre as seções de aquecimento e resfriamento. Para resfriar a seção inferior do tubo, foi

acoplada uma bomba peristáltica com uma válvula globo anexada que regulava água de resfriamento de vazão volumétrica de 334 L/h.

Os valores de temperaturas indicados no amostrador foram registrados após estabilização assim que o experimento atingiu o regime permanente ou estacionário. Esses dados de temperatura para a seção de aquecimento e resfriamento do eixo cilíndrico foram utilizados para a análise térmica do sistema.

O cálculo do fluxo térmico e gradiente de temperatura para as seções de aquecimento e resfriamento foi realizado através das equações 2, 3, 4.

$$Q = V \cdot I \quad (2)$$

$$T_{calor} = T_1 - T_3 \quad (3)$$

$$T_{frio} = T_6 - T_8 \quad (4)$$

Em que Q é o fluxo térmico, V é a tensão elétrica, I é a corrente elétrica, T_i é a temperatura referente a cada termopar, T_{calor} é a variação de temperatura na seção de aquecimento e T_{frio} é a variação de temperatura na seção de resfriamento.

Ademais, para o cálculo da condutividade térmica para as seções de aquecimento, intermediária e de resfriamento utilizaram-se as equações 5, 6, 7, 8 e 9.

$$k_{aquecimento} = \frac{\Delta x_{13} * Q}{A_{quente} * T_{calor}} \quad (5)$$

$$k_{intermediária} = \frac{\Delta x_{int} * Q}{A_{int} * (T_{quente} - T_{frio})} \quad (6)$$

$$k_{resfriamento} = \frac{\Delta x_{68} * Q}{A_{fria} * T_{fria}} \quad (7)$$

$$T_{quente} = T_3 - \frac{(T_2 - T_3)}{2} \quad (8)$$

$$T_{fria} = T_6 - \frac{(T_6 - T_7)}{2} \quad (9)$$

Em que $k_{aquecimento}$, $k_{intermediária}$ e $k_{resfriamento}$ representam a condutividade térmica em cada seção de transporte de calor, A_{quente} , A_{int} e A_{fria} são as áreas da seção de aquecimento, intermediária e resfriamento, respectivamente, Δx_{13} , Δx_{int} e Δx_{68} são as variações de espessura em cada seção e T_{quente} e T_{fria} são as temperaturas nas regiões de fronteira.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 contém os dados de temperatura para a seção intermediária de alumínio, sendo também fornecidos os gradientes térmicos entre cada um dos termopares.

Tabela 1: Valores de temperatura nas duas seções do tubo, na tensão de 14 V, com seção intermediária de alumínio

Termopar	Medida de Temperatura 1 (°C)	Medida de Temperatura 2 (°C)	Média das Medidas	ΔT (°C)
T ₁	73,32	73,33	73,33	5,65
T ₂	67,67	67,68	67,68	5,80
T ₃	61,88	61,87	61,88	6,78
T ₄	55,10	55,09	55,10	2,25
T ₅	52,83	52,83	52,83	5,97
T ₆	46,86	46,87	46,87	4,09
T ₇	42,78	42,78	42,78	4,94
T ₈	37,84	37,84	37,84	-

De acordo com a Tabela 1, a temperatura decresce ao longo da seção uma vez que na seção superior encontra-se a seção de aquecimento, transferindo energia térmica para a seção inferior do cilindro, comprovando que superfícies mais aquecidas transferem calor para superfícies resfriadas.

A Tabela 2 contém os dados de temperatura para a seção intermediária de aço, sendo também fornecidos os gradientes térmicos entre cada um dos termopares.

Tabela 2: Valores de temperatura nas duas seções do tubo em tensão de 14 V com seção intermediária de aço

Termopar	Medida de temperatura 1 (°C)	Medida de temperatura 2 (°C)	Média das medidas	ΔT (°C)
T ₁	86,42	86,42	86,42	0,91
T ₂	85,52	85,52	85,52	1,34
T ₃	84,18	84,18	84,18	47,22
T ₄	36,95	36,94	36,95	2,64
T ₅	34,31	34,31	34,31	2,75
T ₆	31,55	31,56	31,56	-0,26
T ₇	31,81	31,81	31,81	0,64
T ₈	31,17	31,17	31,17	

A partir da Tabela 2, o gradiente térmico verificado entre a última temperatura da seção de resfriamento (T_3) e a primeira da seção intermediária (T_4) foi muito superior à verificada nas outras quedas térmicas. Observa-se assim que houve um decaimento térmico elevado de 47,22 °C entre os termopares T_3 e T_4 visto que a seção intermediária de aço interferiu no aumento do transporte de calor entre as duas seções.

Verifica-se também pela Tabela 1 que a queda térmica na seção intermediária de alumínio entre os termopares T_3 e T_4 foi de apenas 6,78 °C, muito inferior à variação de temperatura encontrada na seção de aço. Justifica-se essa diferença por se tratarem de dois materiais de estruturas moleculares distintas, sendo o latão considerado liga metálica e por isso mais instável para processos de troca térmica (CALLISTER, 2002).

Além disso, houve um leve aumento da temperatura entre os termopares T_6 e T_7 da seção de latão e aço causado possivelmente pela instabilidade do sistema de medição dos termopares na seção de resfriamento. Sabendo que as condutividades térmicas teóricas de latão, aço e alumínio são, respectivamente, 121 W/m°C, 25 W/m°C e 180 W/m°C, obteve-se um gradiente térmico muito elevado entre os termopares T_3 e T_4 , o que pode ser justificado pela diferença de condutividade do latão e aço (FOUST *et al.*, 2012).

A Tabela 3 apresenta os resultados para a seção de aço e alumínio referentes aos principais parâmetros térmicos avaliados na Lei de Fourier como fluxo de calor e gradiente térmico.

Tabela 3: Valores de fluxo térmico, T_{calor} e T_{frio} obtidos para cada uma das seções aplicadas

Medidas	Alumínio	Aço
Tensão (V)	14,03	13,93
Corrente (A)	1,40	1,20
Fluxo térmico (W)	19,64	16,72
T_{calor} (°C)	11,46	2,25
T_{frio} (°C)	9,03	0,38
T_{quente} (°C)	58,98	83,51
T_{fria} (°C)	44,82	31,68

A partir das tabelas 1, 2 e 3, os gradientes térmicos encontrados para o sistema constituído da seção intermediária de alumínio apresentam valores maiores para as seções aquecidas e resfriadas que na seção de aço, uma vez que a condutividade térmica do alumínio é superior à condutividade térmica do aço.

Além disso, o fluxo encontrado para o sistema com a seção intermediária de alumínio apresenta maior valor que na seção de aço, visto que o gradiente térmico é diretamente proporcional à troca térmica entre os dois sistemas. Ademais, sabendo-se que foram utilizados dois diferentes materiais como corpo de prova no sistema de conduto de latão, obtêm-se a Tabela 4 que mostra a condutividade teórica em cada uma das condições.

Tabela 4: Obtenção das condutividades térmicas experimentais para as tensões avaliadas

Condutividade térmica (W/m°C)	Seção de alumínio	Seção de aço
$K_{\text{seção aquecimento}}$	104,841	456,074
$K_{\text{seção intermediária}}$	84,806	19,713
$K_{\text{seção de resfriamento}}$	132,938	2619,504

De acordo com a Tabela 4, as condutividades térmicas obtidas nas seções de aquecimento e resfriamento apresentaram-se próximas da condutividade teórica de 121 W/m°C para o latão na seção de alumínio, enquanto para a seção de aço os dados de condutividade térmica divergiram (INCROPERA & DEWITT, 2008). Além disso, a condutividade térmica obtida na seção de resfriamento foi maior que na seção de aquecimento, uma vez que a queda de temperatura na seção de aquecimento foi maior que na seção de resfriamento como mostrado pela Tabela 3. Por sua vez, na seção intermediária de alumínio, a condutividade térmica calculada apresentou-se superior ao valor de condutividade do latão, ratificando que o latão é um material com menor capacidade de transferência de calor.

A maior diferença entre a condutividade térmica nas seções de aquecimento e resfriamento da região intermediária para o material de aço é devido à sensibilidade do material por se tratar de uma liga metálica e os fatores de resistência térmica do processo de condução (CALLISTER, 2002). Ademais, observa-se que os valores de condutividade térmica na seção de alumínio apresentaram maior proximidade entre as seções de aquecimento e resfriamento, indicando que a contribuição de transferência de calor foi próxima entre as duas seções.

Sabendo-se que foram obtidos diferentes valores de temperatura para a seção de latão e alumínio ou aço, plotam-se os dados das Tabelas 1 e 2 para obter as curvas de perfil de temperatura apresentadas na Figura 3, sabendo-se que as espessuras experimentais entre cada termopar são de 0,015 m.

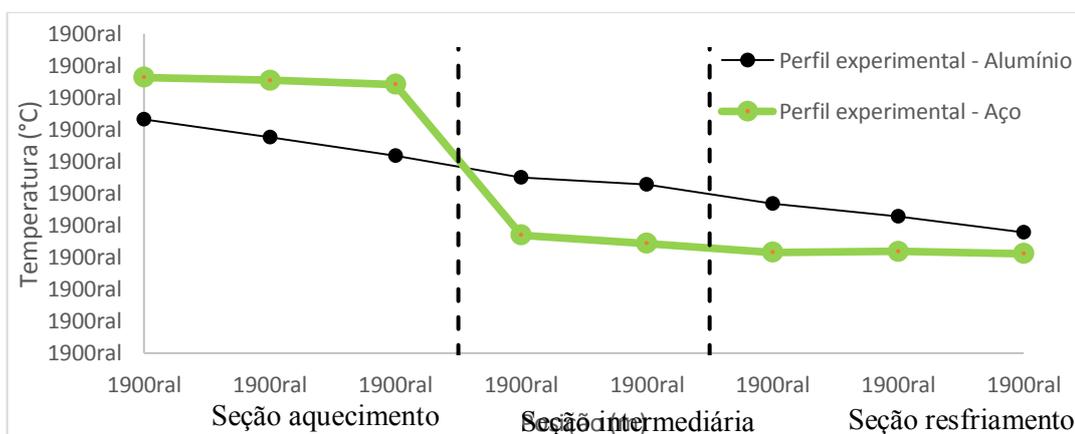


Figura 3: Perfis de temperatura experimental para as seções de latão-alumínio e latão-aço

A partir do perfil de temperatura experimental das seções de latão/alumínio e latão/aço, o comportamento retilíneo com intervalos constantes de espessura entre os pontos é mais próximo quando o alumínio foi aplicado. Além disso, houve uma grande queda de temperatura entre os termopares T_3 e T_4 na seção de aço devido em parte pelo fato de esta região apresentar dois diferentes materiais causando dessa forma uma queda térmica relevante.

Ademais, obtêm-se a Figura 4 do gráfico do perfil de temperatura teórico encontrado pela equação de Fourier para os materiais de alumínio e aço.

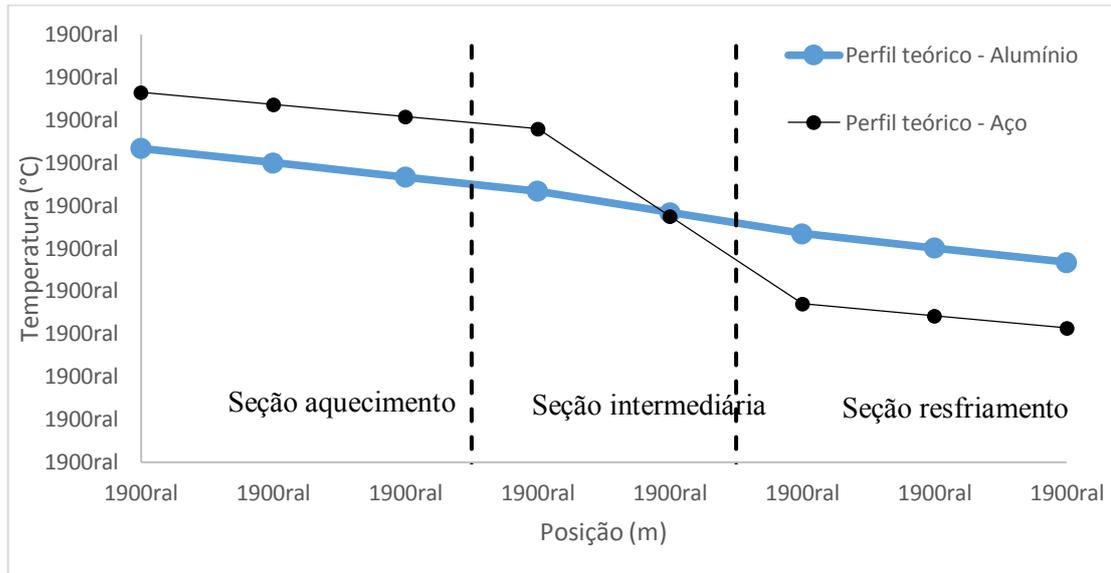


Figura 4: Perfil de temperatura teórico para seção de latão com aço ou alumínio considerando tensão de 14 V

A partir do gráfico da Figura 4, o sistema de latão e alumínio alcançou valores mais próximos de variação de queda de temperatura uma vez que os gradientes térmicos são relativamente mais próximos entre si. Justificam-se os dados discrepantes obtidos para o sistema do latão e aço devido este material se tratar de uma liga metálica e por consequência apresentar comportamento mais distante da idealidade por ser uma mistura de dois componentes (CALLISTER, 2002). Ademais, o sistema de aço e latão apresenta maior diferença de condutividade térmica entre os materiais, possibilitando que a queda térmica entre a seção de aquecimento e a intermediária seja superior ao comportamento do sistema de latão e alumínio.

As Figuras 5 e 6 mostram os gráficos com os perfis de temperatura experimentais e teóricos dos sistemas de latão/aço e latão/alumínio, respectivamente.

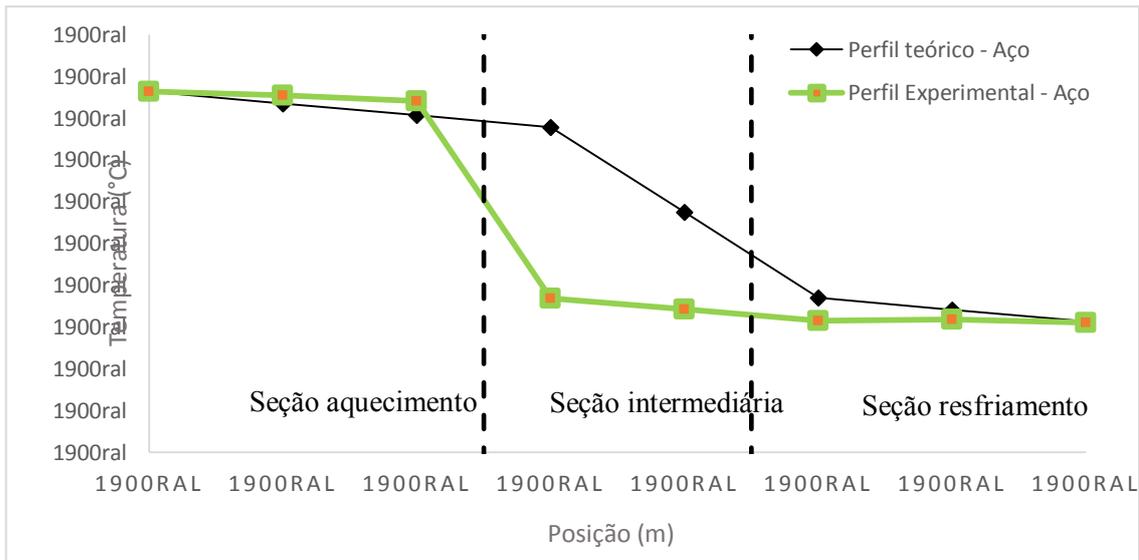


Figura 5: Perfil de temperatura teórico e experimental para seção de latão e aço

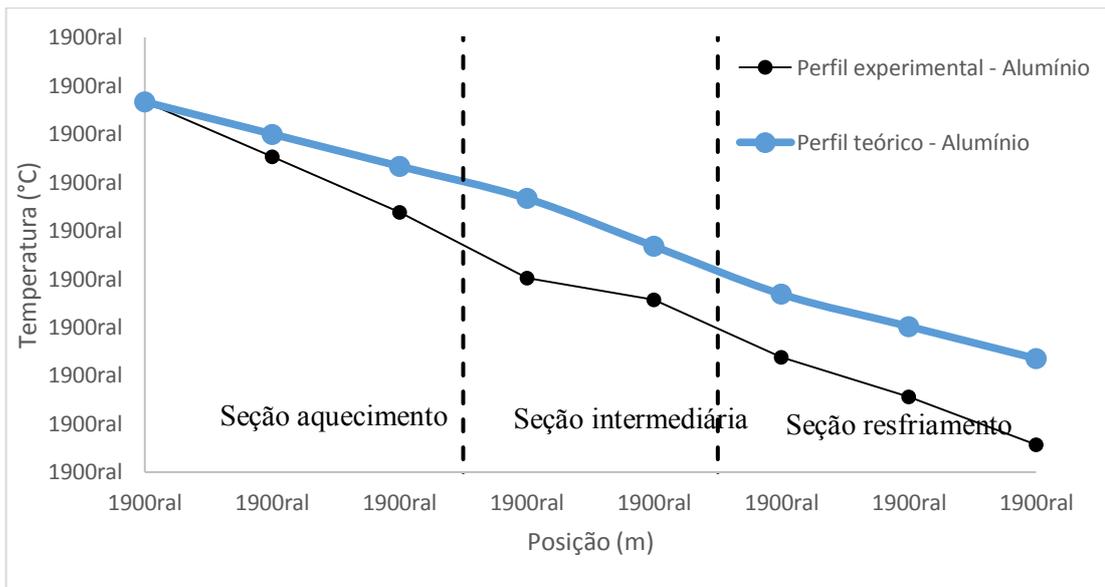


Figura 6: Perfil de temperatura teórico e experimental para seção de latão e alumínio

Considerando os gráficos das Figuras 5 e 6, o perfil de temperatura por posição apresenta comportamento relativamente próximo entre o experimental e o teórico na seção de latão-alumínio, enquanto na seção de latão-aço ocorreu distanciamento relevante na seção intermediária entre 0,045 m e 0,060 m.

4. CONCLUSÕES

A partir dos estudos realizados nesta metodologia, o fenômeno de transferência térmica em regime estacionário foi estudado e analisado. Para ambos os arranjos utilizados, observou-se o decaimento gradativo de temperatura ao longo do equipamento sendo que este se acentua nos limites físicos das seções.

Verificou-se também experimentalmente que a seção de resfriamento do equipamento possui um maior coeficiente de transferência de calor que a seção de aquecimento para todas as condições de tensão alimentada além de apresentar valores maiores de acordo com o aumento de tensão.

Através da lei de Fourier, obtiveram-se as espessuras equivalentes entre os termopares acoplados ao sistema. Quanto ao corpo de prova utilizado, constatou-se que existe uma grande influência das propriedades do material condutor para o comportamento de transferência de calor no sistema. Observou-se que os dados calculados de espessura e perfil de temperatura foram mais próximos do experimental para o sistema de latão e alumínio do que no latão/aço.

Portanto, a condução térmica no latão com diferentes materiais mostra como diferentes parâmetros como o gradiente de temperatura, espessura do meio de propagação e o tipo de material condutor influenciam no processo de troca térmica.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa: uma Abordagem Prática**. 4. ed. McGraw-Hill Interamericana, 2012.

DIDATECH. **Módulo de bancada de condução térmica linear TE6A**, São Paulo/SP, 2018

FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W., MAUS, L. ANDERSEN, L. B. **Princípios das operações unitárias**. LTC, segunda edição, 2012.

GEANKOPLIS, C.J. **Transport Process and Unit Operation**. 4ª edição, Prentice-Hall International, 2003.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 5ed, Rio de Janeiro, 2008.