

Estimativa simultânea da capacidade de calor volumétrica e da condutividade térmica de materiais metálicos

Luís Felipe dos Santos Carollo
felipecarollo@unifei.edu.br
Universidade de Federal de Itajubá

Gustavo Meirelles Lima
limameirelles@gmail.com
Universidade de Federal de Itajubá

Ana Lúcia Marcondes de Lima e Silva
alfsilva@unifei.edu.br
Universidade de Federal de Itajubá

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva
metrevel@unifei.edu.br
Universidade de Federal de Itajubá

Resumo

O conhecimento preciso das propriedades termofísicas, condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica, é muito importante, por exemplo, na otimização de projetos em engenharia e no desenvolvimento de novos materiais. Então, apresenta-se neste trabalho um método para a estimativa simultânea destas propriedades em amostras de Aço Inox AISI 316 e de Titânio ASTM B265 Grau 2. Neste método estas propriedades são determinadas simultaneamente através do mesmo transiente térmico experimental. Neste modelo, é empregado um fluxo de calor constante na superfície superior da amostra e condição de isolamento na outra superfície. As temperaturas são medidas na face oposta ao aquecimento empregando-se um termopar tipo K. Para determinar estas propriedades utiliza-se a técnica seqüencial de otimização BFGS na minimização de uma função erro. Com o objetivo de determinar a melhor região para estimar estas propriedades são feitas análises dos coeficientes de sensibilidade. As propriedades térmicas estimadas apresentaram boa concordância com a literatura.

Palavras-chave: Propriedades termofísicas. Regime transiente. Determinação simultânea. Métodos experimentais. Otimização.

Abstract

The accurate knowledge of thermophysical properties like volumetric heat capacity and thermal conductivity is very important regarding the optimization of engineering design and development of new materials. Then, a method for the simultaneous estimation of these properties in Stainless Steel AISI 316 and Titanium ASTM B265 Grade 2 samples is presented in this paper. In this method, these properties are determined simultaneously through the same transient experiment. A steady heat flux on the upper surface of the sample as well as insulation condition on the other surface is used in this model. The temperatures are measured on the opposite surface to heating employing thermocouple. To determine these properties the BFGS sequential optimization technique is used to minimize an error function. In order to determine the best region to estimate these properties, analyses of the sensitivity coefficients are done. The estimated thermal properties were in good agreement with the literature.

Keywords: Thermophysical properties. Transient state. Simultaneous estimation. Experimental methods. Optimization.

1 Introdução

Nos dias de hoje, devido à globalização, necessita-se cada vez mais de novas técnicas que determinem com rapidez, confiabilidade e precisão, as propriedades termofísicas dos materiais que se deseja utilizar. Outro aspecto importante é a questão econômica, pois quanto menor o custo para determinar as propriedades, garantindo confiabilidade, maior é a chance de disputar o mercado nacional e internacional. A técnica proposta neste trabalho pode ser utilizada, por exemplo, para escolher corretamente, do ponto de vista térmico, o material a ser utilizado na confecção de um trocador de calor. Esta escolha é realizada através dos valores obtidos das propriedades termofísicas, que devem ser ideais para gerar uma economia que está ligada diretamente às questões energéticas e ambientais, amplamente discutidas na atual circunstância mundial. Cita-se também, um processo de torneamento onde é necessário que grande parte do calor gerado pelo atrito entre a peça usinada e a ferramenta de corte seja transferido para o porta-ferramenta, visto que o desgaste da ferramenta

está diretamente ligado ao aumento de sua temperatura. Desta forma, pode-se escolher a ferramenta adequada para o processo através do conhecimento de sua condutividade térmica, pois esta propriedade determina a faixa de temperatura de trabalho do material. A partir destas necessidades, pesquisadores desenvolveram várias técnicas que estão sendo aprimoradas a cada dia. Estas técnicas podem estimar as propriedades de forma simultânea e não-simultânea.

Pode-se destacar três métodos que são mais frequentemente utilizados, o Método da Placa Quente Protegida, o Método do Fio Quente e o Método Flash. O Método da Placa Quente Protegida (ASTM, 1997) é muito utilizado na determinação da condutividade térmica, λ , de materiais isolantes, pois é considerado por inúmeros pesquisadores como Wulf *et al.* (2005), Lima *et al.* (2008), entre outros, o método mais preciso e confiável. Neste método uma amostra homogênea e isotrópica, na forma de placa plana é colocada em sanduíche entre uma placa quente e uma placa fria em condições tais que o fluxo de calor que atravessa a área central da amostra é unidirecional. Nas condições de regime permanente, a condutividade térmica é calculada pela medição do fluxo de calor e do gradiente médio de temperatura na amostra. O segundo método citado, o Método do Fio Quente apresentado em Blackwell (1954) tornou-se muito utilizado na determinação da condutividade térmica. Esta técnica é basicamente realizada inserindo-se uma sonda cilíndrica no meio de uma amostra e dentro desta sonda estão inseridos um fio de resistência e um termopar. Este método também pode ser empregado para a obtenção da difusividade térmica, α , sendo necessária a aplicação de mais um termopar na amostra. Uma desvantagem deste método está relacionada à utilização de materiais metálicos, devido à alta resistência de contato entre a sonda e a amostra, visto que é muito difícil eliminar os interstícios de ar presente na montagem. Pesquisadores têm aprimorado esta técnica no intuito de determinar as propriedades de outros materiais. Cita-se, por exemplo, Nahor *et al.* (2003) que otimizaram a posição do fio quente para encontrar a condutividade de alimentos e Adjali e Laurent (2007) que propuseram uma modificação na metodologia para determinar a condutividade de uma mistura de água-ágar gel, variando com a temperatura. O Método Flash desenvolvido por Parker *et al.* (1961) é empregado na determinação da difusividade térmica. Esta técnica consiste na aplicação de um pulso de calor radiante de grande intensidade e de pequena duração, imposto em uma superfície da amostra a ser analisada. Com base no tempo necessário para que a temperatura na face oposta atinja o valor máximo, torna-se possível a obtenção da difusividade térmica. Uma limitação para esta técnica é a necessidade do conhecimento da quantidade de energia absorvida na face frontal da amostra para a determinação da condutividade térmica. Sendo este um tema bastante pesquisado, novos métodos foram desenvolvidos para melhorar e tornar mais viável economicamente a metodologia proposta por Parker *et al.* (1961) (Shibata 2002, Santos *et al.*, 2005 e Coquard e Panel 2008).

Taktak *et al.* (1993) determinaram λ e a capacidade de calor volumétrica, ρc_p , de forma simultânea para uma matriz de fibra de carbono e epóxi. A montagem consistiu de uma amostra quadrada com condição de fluxo prescrito na superfície superior e temperatura prescrita na outra face, sendo que as temperaturas foram monitoradas em ambas as faces. Esse trabalho teve por objetivo demonstrar as condições ideais para realizar o experimento de forma a conseguir resultados confiáveis e precisos. Buscando encontrar a melhor região de estudo para obtenção das propriedades foi realizada uma análise de sensibilidade e do determinante, sendo que os critérios escolhidos para tal análise são: posição do termopar em relação ao aquecedor, tempo de duração do experimento e do aquecimento. Desta forma, concluiu-se que para se obter resultados mais precisos era viável coletar as temperaturas o mais perto possível do fluxo de calor e aquecer a amostra a ser investigada pelo menor tempo possível.

Dowding *et al.* (1995) utilizaram uma técnica sequencial em experimentos transientes para determinar λ e ρc_p de forma simultânea para um composto de carbono-carbono. A montagem simétrica consistiu em um aquecedor colocado entre duas amostras isoladas por uma placa de cerâmica (isolante). Esse trabalho foi desenvolvido para o modelo térmico unidimensional, estudando a influência da posição dos termopares na amostra através da análise dos coeficientes de sensibilidade. As propriedades foram estimadas variando a temperatura inicial desde a temperatura ambiente até 623 °C através de um forno com atmosfera controlada.

No trabalho apresentado por Blackwell *et al.* (2000) foi proposto determinar λ em regime transiente. Para alcançar este objetivo, os coeficientes de sensibilidade foram analisados a fim de guiar o projeto de um experimento para estimar a condutividade térmica para o aço AISI 304. A condutividade pôde ser determinada por uma configuração experimental, onde a condução de calor foi considerada axial nas paredes de um cilindro oco.

Jannot *et al.* (2006) desenvolveram o Método da Placa Quente Transiente para determinar simultaneamente a efusividade e a condutividade térmica de materiais metálicos como alumínio, titânio e aço. O dispositivo proposto consiste em um aquecedor localizado entre uma amostra plana do material a ser analisado e uma placa de material isolante. Para

garantir o modelo unidimensional, utiliza-se um aquecedor e uma amostra com a mesma área, além de desprezar as perdas oriundas do fenômeno de convecção. Sensores de temperatura foram utilizados para que se pudesse estimar as propriedades através da minimização de uma função erro quadrática entre a temperatura experimental e numérica. Estudos de sensibilidade foram realizados para determinar a melhor região de análise das propriedades e a espessura ideal da amostra. Uma desvantagem desse trabalho refere-se a grande espessura das amostras utilizadas, dificultando o manuseio das mesmas e elevando o custo da técnica.

Borges *et al.* (2006) apresentaram um método onde se tornou possível obter de forma simultânea e independente α e λ de materiais condutores e não condutores. Uma vantagem desta técnica se refere ao fato de obter as propriedades simultaneamente, porém de forma independente, visto que se aplicam duas funções objetivos, uma no domínio da frequência e outra no domínio do tempo. As funções são obtidas através do cálculo da fase da função resposta em frequência de um sistema dinâmico e a outra com base nas temperaturas conhecidas. Uma desvantagem deste trabalho é o número pequeno de pontos para estimar o α e como ele é estimado primeiro, isso pode influenciar nos resultados de λ .

Analisando os trabalhos citados acima, percebe-se que em alguns a determinação das propriedades ocorre com precisão para apenas uma propriedade, e em outros existe a dificuldade em determinar estas propriedades de forma simultânea. Assim, o método proposto no presente trabalho é baseado em um modelo de condução de calor unidimensional transiente. As propriedades são estimadas de forma simultânea através da minimização de uma função erro quadrática. Para minimizar a função erro, é utilizada a técnica sequencial de otimização BFGS. Esta função é baseada na diferença entre a temperatura experimental e a numérica. O campo de temperaturas simulado numericamente é obtido através da solução da equação da difusão de calor para o modelo térmico proposto, utilizando o método das diferenças finitas com formulação implícita. Além disso, é realizada uma análise dos coeficientes de sensibilidade buscando obter a melhor configuração e região para obtenção das propriedades.

Portanto, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia, buscando eliminar as dificuldades encontradas em outros trabalhos, para determinar a condutividade térmica e a capacidade de calor volumétrica de forma simultânea para materiais metálicos.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Modelo Térmico 1D

Na Figura 1, apresenta-se o modelo térmico unidimensional que consiste em uma amostra localizada entre um aquecedor resistivo e um isolante. Para garantir o fluxo unidirecional a amostra analisada possui espessura muito menor comparada às outras dimensões. Além disso, todas as superfícies da amostra, exceto a aquecida ($x = 0$), foram isoladas.

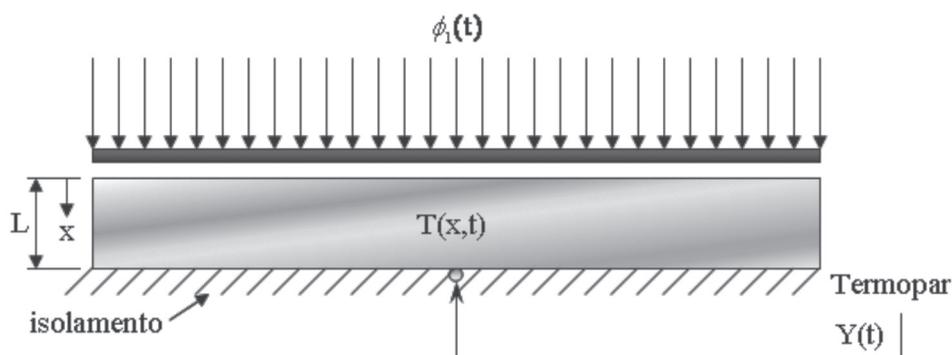


Figura 1: Modelo térmico unidimensional.

A equação da difusão de calor que descreve o problema apresentado na Fig. 1 pode ser escrita como sendo:

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\rho c_p}{\lambda} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

sujeita às condições de contorno:

$$-\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = \phi_1(t) \text{ em } x = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = 0 \text{ em } x = L \quad (3)$$

e à condição inicial:

$$T(x,t) = T_0 \text{ em } t = 0 \quad (4)$$

sendo x a coordenada cartesiana, t o tempo, ϕ_1 o fluxo de calor imposto, T_0 a temperatura inicial do corpo e L a espessura da amostra.

O campo de temperaturas simulado numericamente é obtido através da solução da equação da difusão unidimensional utilizando o método de diferenças finitas com formulação implícita.

2.2 Análise da Melhor Região para Determinar as Propriedades ρc_p e λ

Estudos dos coeficientes de sensibilidade para cada amostra foram realizados neste trabalho com o intuito de determinar a região ideal para estimar as propriedades e a melhor configuração da montagem experimental. Este estudo fornece informações como, por exemplo: o correto posicionamento dos termopares, tempo dos ensaios, intervalo de tempo da incidência do fluxo de calor imposto e incremento de tempo para a leitura das temperaturas. Quanto maior o valor dos coeficientes, melhor é a possibilidade de obter as propriedades de forma confiável.

O coeficiente de sensibilidade é definido como sendo a primeira derivada parcial da temperatura em relação ao parâmetro que se deseja analisar (ρc_p e λ), sendo escrito da seguinte forma:

$$X_j = P_i \frac{\partial T_j}{\partial P_i} \quad (5)$$

onde T é a temperatura calculada numericamente, P o parâmetro que deseja-se analisar (ρc_p ou λ), i o contador para o número de parâmetros e j o contador para o número de pontos. Como neste trabalho determina-se ρc_p e λ , tem-se: $i = 1$ para ρc_p e $i = 2$ para λ .

2.3 Estimativa da Capacidade de Calor Volumétrica e da Condutividade Térmica

Para estimar estas duas propriedades faz-se necessário utilizar uma função objetivo, baseada no erro quadrático entre a temperatura experimental e a numérica. A seguir apresenta-se a equação da função em questão:

$$F = \sum_{j=1}^m (Y_j - T_j)^2 \quad (6)$$

sendo m o número total de pontos e Y a temperatura experimental.

Desta forma, sabe-se que o valor ótimo para ρc_p e λ , ou seja, o valor que minimiza a função objetivo é o valor da propriedade que se deseja estimar. Para obter este valor pode-se utilizar técnicas de otimização, sendo que neste trabalho é utilizada a técnica seqüencial de otimização BFGS (Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno) apresentada em Vanderplaats (2005). Esta técnica é uma particularidade dos Métodos da Métrica Variável. As vantagens deste método são a rápida velocidade de convergência e a facilidade para se trabalhar com um grande número de variáveis de projeto. Por se tratar de um método de primeira ordem é necessário conhecer o gradiente da função objetivo. Para o cálculo do gradiente é utilizado neste trabalho o pacote computacional Design Optimization Tools - DOT (Vanderplaats, 2005).

3 Procedimento Experimental

A bancada utilizada para determinar as propriedades do Aço Inox AISI 316 e do Titânio ASTM B265 Grau 2 está representada pela Fig. 2. A placa de aço inox possui as dimensões de 49,90 x 49,90 x 9,90 mm e a placa de titânio 49,90 x 49,90 x 9,10 mm. O aquecedor resistivo de kapton apresenta uma resistência de 15 Ω e possui as dimensões de 50,00 x 50,00 x 0,20 mm. O aquecedor resistivo de kapton é utilizado devido sua espessura ser muito fina, permitindo o aquecimento uniforme com maior rapidez. Este aquecedor é conectado a uma fonte de alimentação digital MCE 1051, para fornecer o fluxo de calor necessário. Para minimizar os erros na medição do fluxo de calor utilizou-se uma montagem simétrica e, além disso, os valores de corrente e tensão aplicados foram medidos pelos multímetros Instrutherm MD-380 e Minipa ET-2042C, previamente calibrados. Devido ao contato entre o aquecedor resistivo e a amostra não ser perfeito utilizou-se a pasta térmica de prata Arctic Silver 5 para eliminar os interstícios de ar presentes na montagem. A grande vantagem desta pasta refere-se à sua alta condutividade térmica. Além disso, foram utilizados pesos acima da montagem para melhorar o contato entre os componentes. Para ajudar a garantir um fluxo de calor unidirecional e eliminar grande parte da convecção causada pelo ar circulando no ambiente, isolou-se a montagem com placas de isopor de 50 mm de espessura. As temperaturas foram coletadas através de um termopar do tipo K (30AWG) soldado por descarga capacitiva e calibrado usando um banho calibrador de temperatura Marconi MA 184 com uma resolução de $\pm 0,01$ °C. Este termopar foi conectado a aquisição de dados Agilent 34980A controlada por um micro computador. Visando obter melhores resultados, todos os experimentos foram realizados com a temperatura da sala controlada.

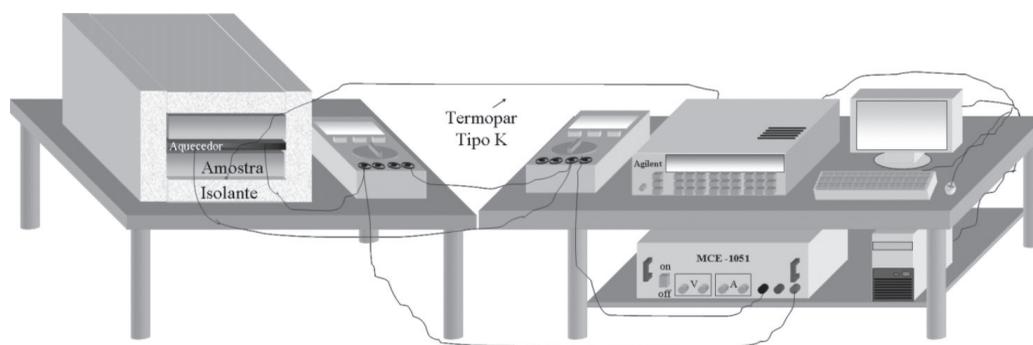


Figura 2: Esquema da bancada utilizada para determinar as propriedades.

4 Análise de Resultados

4.1 Aço Inox AISI 316

Foram realizados 30 experimentos para a estimativa da capacidade de calor volumétrica e da condutividade térmica do Aço Inox AISI 316. Cada experimento teve duração de 220 s, porém, o fluxo de calor foi imposto somente no intervalo de 0 a 160 s. O fluxo de calor aplicado foi de aproximadamente 2560 W/m². O intervalo de tempo utilizado para monitorar as temperaturas foi de 0,1 s.

A análise de sensibilidade foi realizada com o intuito de determinar a melhor região para estimar as propriedades. Esta análise foi realizada usando os valores de ρc_p e λ obtidos de Incropera *et al.* (2007). A Figura 3 apresenta a temperatura experimental em $x = L$ e o fluxo de calor imposto em $x = 0$ para um experimento. A Figura 4 apresenta os coeficientes de sensibilidade para ρc_p e λ .

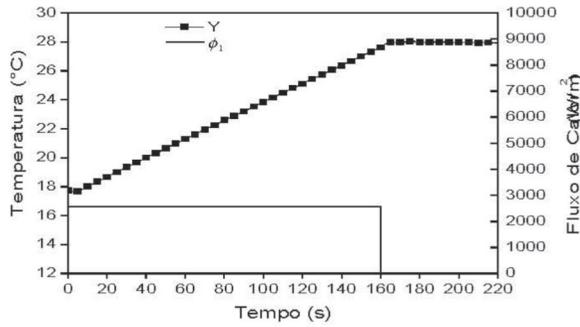
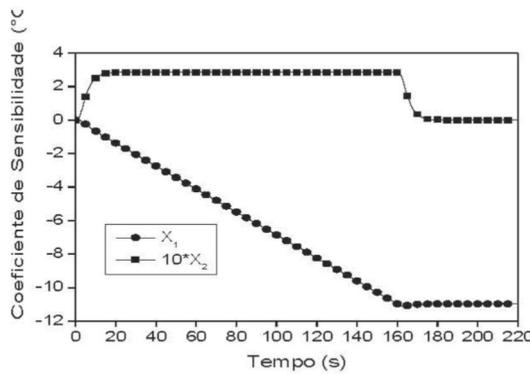


Figura 3: T



em $x = 0$.

Figura 4: Coeficientes de Sensibilidade para ρc_p e λ .

X_1 representa o coeficiente para ρc_p na superfície oposta ao aquecimento. O coeficiente X_2 representa a sensibilidade para λ na superfície inferior da amostra. Analisando as curvas de sensibilidade percebe-se que a sensibilidade do ρc_p é cerca de 20 vezes maior que a do λ e, além disso, nesta região de alta sensibilidade para o ρc_p (150 a 1600 pontos) não existe sensibilidade para o λ . Desta forma, decidiu-se realizar a estimativa das propriedades da seguinte maneira. Determinou-se primeiro o ρc_p , pois este possui maior sensibilidade e posteriormente determinou-se λ a partir do valor encontrado para ρc_p . A análise foi realizada desta maneira com o intuito de diminuir os erros na estimativa da segunda propriedade, pois quanto maior a sensibilidade, maior é a precisão e confiabilidade do valor da propriedade estimada. Outro objetivo da análise de sensibilidade é determinar o número de pontos da curva que devem ser utilizados para estimar as propriedades. Estes pontos a serem considerados não devem possuir derivada nula. O conjunto de pontos que não se encaixam nesta descrição devem ser desprezados na estimativa das propriedades. Como a estimativa das propriedades ocorreu separadamente, tomou-se o cuidado de utilizar apenas os pontos de sensibilidade para ρc_p onde não existia sensibilidade para a condutividade térmica. Portanto, para determinar o ρc_p , utilizou-se 1450 pontos que se encontram no intervalo de 15 a 160 s, como pode ser visualizado na Figura 4. A partir deste valor estimado, partiu-se para a determinação do λ . Em seguida foi necessário utilizar os pontos onde existia sensibilidade para estimar a condutividade térmica. Assim, utilizou-se os pontos que se encontram no intervalo de 0 a 15 s, totalizando 150 pontos, conforme mostra a Figura 4.

A Figura 5 mostra a comparação entre a distribuição de temperatura experimental e numérica para chapa em $x = L$. O campo de temperaturas simulado numericamente foi obtido empregando-se os valores estimados das propriedades ρc_p e λ para um dos experimentos realizados. Na Figura 6 são apresentados os resíduos de temperatura, ou seja, a diferença em porcentagem entre a temperatura experimental e a temperatura calculada a partir dos valores estimados de ρc_p e λ . Observa-se a boa concordância dos resultados para o Aço Inox AISI 316, visto que ocorre uma diferença de no máximo 1,3 %. Esses desvios podem ter ocorrido devido à resistência de contato existente entre o aquecedor resistivo e a amostra e pela dificuldade de isolar o experimento.

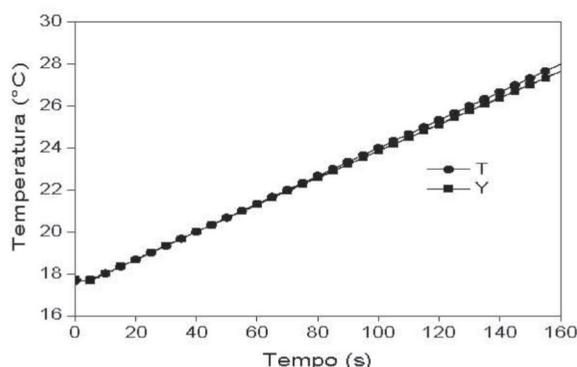


Figura 5: Comparação entre temperatura experimental (Y) e numérica (T).

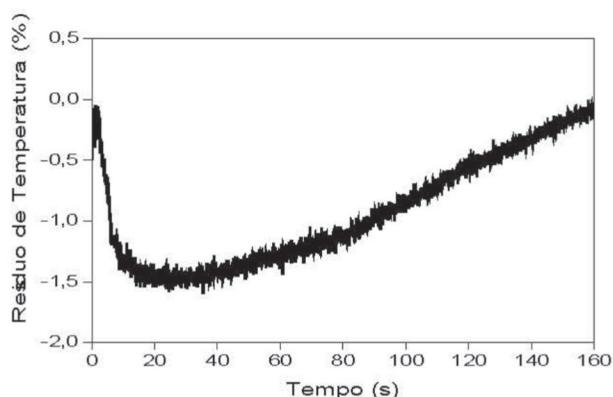


Figura 6: Resíduo entre as temperaturas experimental e numérica.

Na Tabela (1) encontram-se os valores médios obtidos, os desvios padrão e a comparação com os valores da literatura para o ρc_p e λ do Aço Inox AISI 316.

Tabela 1: Resultados obtidos para as propriedades termofísicas do aço inox.

Propriedade	Média	Referência	Desvio Padrão	Diferença (%)
ρc_p (Ws/m ³ K)	3,87x10 ⁶	3,86x10 ⁶	± 0,04x10 ⁶	0,25
λ (W/mK)	12,89	13,40	± 0,53	3,81

A diferença entre os valores estimados de ρc_p e λ com os valores da literatura (Incropera *et al.*, 2007) pode ter ocorrido devido à dificuldade de se garantir um isolamento perfeito na amostra de Aço Inox AISI 316, mesmo assim, eles encontram-se coerentes aos valores da literatura. Uma forma de minimizar este problema seria colocar as amostras a serem caracterizadas termicamente dentro de uma estufa a vácuo.

Uma explicação para o erro na determinação do λ ser maior em comparação ao do ρc_p deve-se ao fato da determinação da condutividade térmica ocorrer a partir de um valor estimado, ou seja, um valor que já possui erro. Mesmo assim, o erro encontrado na estimativa da condutividade térmica está em conformidade com os resultados encontrados na literatura.

4.2 Titânio ASTM B265 Grau 2

Nesta parte apresenta-se uma análise dos resultados obtidos para a determinação de ρc_p e λ de uma amostra de Titânio ASTM B265 Grau 2. Realizou-se 15 experimentos, sendo que foram adquiridos 2200 pontos em cada um. O incremento de tempo utilizado para medir as temperaturas foi o mesmo do Aço Inox AISI 316 (0,1 s). O fluxo de calor empregado foi da ordem de 2613 W/m², durante 160 s.

A Figura 7 apresenta o fluxo de calor imposto junto à temperatura experimental. A análise de sensibilidade foi realizada conforme descrito no estudo do aço inox e encontra-se na Fig. 8.

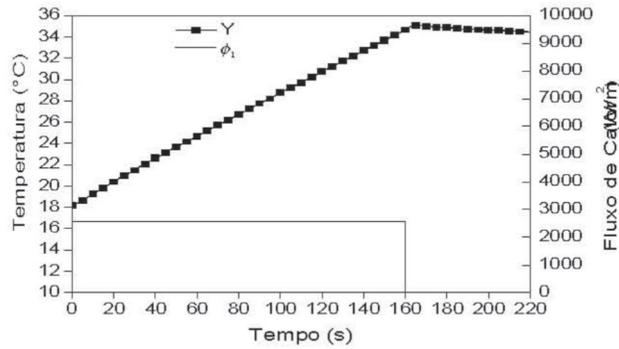


Figura 7: Temperatura experimental em $x = L$ e fluxo de calor imposto em $x = 0$.

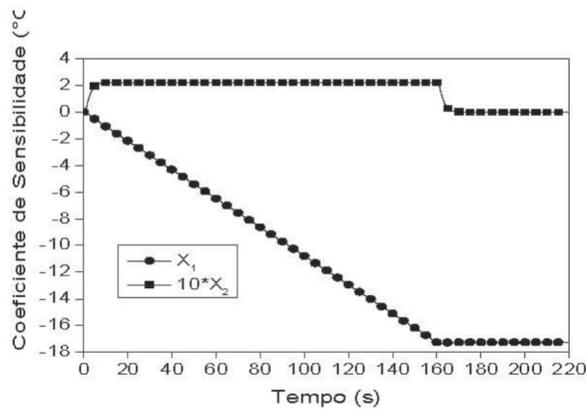


Figura 8: Coeficientes de Sensibilidade para ρc_p e λ .

A determinação das propriedades do titânio foi realizada da mesma maneira e levando-se em conta as mesmas considerações efetuadas para o aço inox. A seguir, a Fig. 9 apresenta a comparação entre as temperaturas experimental e a numérica, calculada utilizando as propriedades estimadas de um experimento, e a Fig. 10 apresenta o resíduo de temperatura. Novamente, o resíduo encontrado deve-se a dificuldade de isolar completamente o experimento e da resistência de contato entre o aquecedor e a amostra.

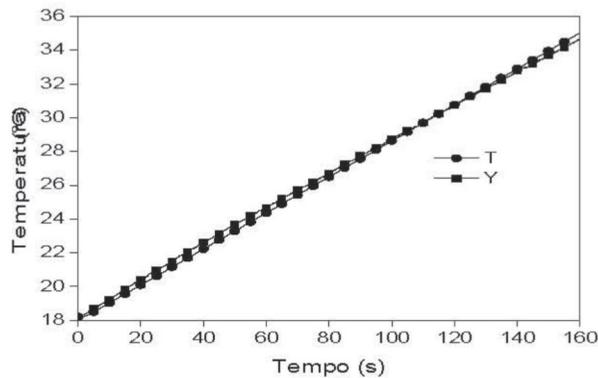


Figura 9: Comparação entre temperatura experimental (Y) e numérica (T).

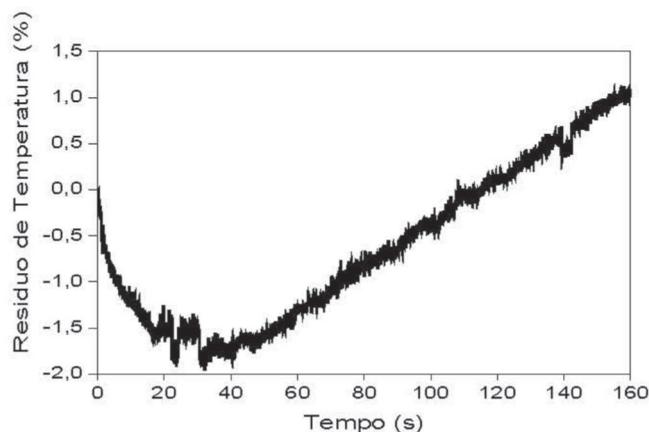


Figura 10: Resíduo entre as temperaturas experimental e numérica.

A Tabela (2) apresenta o valor médio estimado, o desvio padrão e a comparação com o valor de referência, obtido em GMTitanium (2010), para o ρc_p e λ do Titânio ASTM B265 Grau 2.

Tabela 2: Resultados obtidos para as propriedades termofísicas do titânio.

Propriedade	Média	Referência	Desvio Padrão	Diferença (%)
ρc_p (Ws/m ³ K)	2,67x10 ⁶	2,66x10 ⁶	± 0,03x10 ⁶	0,38
λ (W/mK)	17,85	18,06	± 0,38	1,16

Similar ao aço inox, os resultados encontrados apresentaram boa concordância quando comparado aos valores da literatura. Novamente, a diferença encontrada pode ter ocorrido devido ao isolamento não ser perfeito.

5 Conclusões

Uma técnica para determinação simultânea da capacidade de calor volumétrica e da condutividade térmica para materiais metálicos foi apresentada neste trabalho. Dois materiais foram analisados: Aço Inox AISI 316 e Titânio ASTM B265 Grau 2. Para ambos os materiais encontrou-se resultados satisfatórios estimando as propriedades de forma simultânea, visto que os erros encontrados foram menores que 2 % para o Titânio e 4 % para o Aço Inox. Para trabalhos futuros, propõe-se utilizar uma estufa à vácuo para eliminar os problemas com a perda de calor por convecção, aplicar fluxímetros para medir o fluxo de calor imposto e por fim, usar o modelo térmico tridimensional possibilitando o posicionamento dos termopares em vários pontos da amostra, buscando regiões que apresentam maior sensibilidade para a determinação das propriedades.

Referências

- ADJALI, M. H.; LAURENT, M. Thermal conductivity estimation in non-linear problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Kingston-upon-Thames, v. 50, p. 4623-4628, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C177*: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. West Conshohocken, 1997.
- BLACKWELL, B. F. et al. determination of thermal conductivity of 304 stainless steel using parameter estimation techniques. In: NATIONAL HEAT TRANSFER CONFERENCE, 34., 2000, Pittsburgh: NHTC, 2000. p. 1-8.
- BLACKWELL, J. H. A transient flow method for determination of thermal constants for insulating materials in bulk. *Journal of Applied Physics*, London, v. 25, p. 137-144, 1954.
- BORGES, V. L.; LIMA e SILVA, S. M. M.; GUIMARÃES, G. A dynamic thermal identification method applied to conductor and non conductor materials. *Inverse Problems in Science and Engineering*, Uberlândia, v. 14, n. 5, p. 511-527, 2006.

- COQUARD, R.; PANEL, B. Adaptation of the flash method to the measurement of the thermal conductivity of liquids or pasty materials. *International Journal of Thermal Sciences*, Villeurbanne Cedex, v. 48, p. 747-760, 2008.
- DOWDING, K. J. et al. Estimation of thermal properties and surface heat flux in carbon-carbon composite. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, East Lansing, v. 9, n. 2, p. 345-351, 1995.
- GMTTITANIUM. *Titanium ASTM B265 Grade 2*. Disponível em: <www.gmttitanium.com>. Acesso em: 22 fev. 2010.
- INCROPERA, F. P. et al. *Fundamentals of heat and mass transfer*: 6th ed. Los Angeles: Wiley, 2007. 997 p.
- JANNOT, Y.; ACEM, Z.; KANMOGNE, A. Transient hot plate method with two temperature measurements for thermal characterization of metals. *Measurement Science and Technology*, Talence Cedex, v.17, p. 69-74, 2006.
- LIMA, G. M. et al. Determinação da condutividade térmica pelo método da placa quente protegida. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 5., 2008, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABCM, 2008. v.1. p. 1-10.
- NAHOR, H. B. et al. Optimization of the temperature sensor position in a hot wire probe set up for estimation of the thermal properties of foods using optimal experimental design. *Journal of Food Engineering*, Leuven, v. 57, p. 103-110, 2003.
- PARKER, W. J. et al. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity. *Journal of Applied Physics*, San Francisco, v. 32, n. 9, p. 1679-1684, 1961.
- SANTOS, W. N.; MUMMERY, P.; WALLWORK, A. Thermal diffusivity of polymers by the laser flash technique. *Polymer Testing*, São Carlos, v. 24, p. 628-634, 2005.
- SHIBATA, H. et al. A novel laser flash method for measuring thermal diffusivity of molten metals. *Journal of Non-Crystalline Solids*, Sendai, v. 312, p. 172-176, 2002.
- TAKTAK, R.; BECK, J. V.; SCOTT, E. P. Optimal experimental design for estimating thermal properties of composite materials. *International Journal of Heat Mass and Transfer*, East Lansing, v. 36, n. 12, p. 2977-2986, 1993.
- VANDERPLAATS, G. N. Numerical optimization techniques for engineering design. New York: McGraw-Hill, 2005. 465 p.
- WULF, R.; BARTH, G.; GROSS, U. Intercomparison of insulation thermal conductivities measured by various methods. *International Journal of Thermophysics*, Freiberg, v. 28, p. 1679-1692, 2007.