



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS INVERSAS EM TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Cristiano Pedro da Silva, gr9942@gmail.com
Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva, alfsilva@unifei.edu.br
Sandro Metrevelle de Lima e Silva, metrevel@unifei.edu.br

Universidade Federal de Itajubá– UNIFEI, Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Laboratório de Transferência de Calor – LabTC, Campus Prof. José Rodrigues Seabra, Av. BPS 1303, Itajubá, MG, Brasil.

Resumo: Em transferência de calor, o uso de problemas inversos permite a estimação do fluxo de calor na superfície de uma amostra utilizando as temperaturas experimentais obtidas em diferentes posições desta amostra. Neste trabalho o objetivo é estudar numericamente o processo de transferência de calor em problemas unidimensionais para as amostras de aço inox AISI 316 e de alumínio 5052 usando várias técnicas de problemas inversos. Para isso o software Ignis que foi desenvolvido para resolver a equação da difusão tridimensional transiente foi usado. Neste software a equação da difusão 3D em coordenadas cartesianas foi resolvida usando diferenças finitas para o espaço e o método implícito de Euler para a discretização do tempo. O software Ignis também tem implementadas as seguintes técnicas: Seção Áurea, Recozimento Simulado, Brent, Função Especificada, Regularização de Tikhonov e Métrica Variável. Neste trabalho estas técnicas são comparadas com relação a análise de precisão e o tempo de processamento para a estimação do fluxo de calor. A metodologia é validada com experimentos controlados em laboratório. As amostras são sujeitas a um fluxo de calor em uma superfície e as demais são isoladas. Os sensores de temperatura são fixados por descarga capacitiva no lado oposto a superfície que recebe calor. Um aquecedor resistivo é usado para gerar o fluxo de calor constante em uma montagem simétrica. Os valores de temperatura são obtidos usando termopares do tipo K. Os resultados numéricos são comparados com os valores experimentais e também com a literatura. As técnicas Função Especificada e Regularização de Tikhonov apresentaram melhores resultados quando comparadas com os outros métodos.

Palavras-chave: problemas inversos, condução de calor, otimização, estimação de fluxo de calor, métodos numéricos e experimentais.

1. INTRODUÇÃO

O uso de problemas inversos abrange grandes áreas do conhecimento humano. Em medicina é utilizado em tomografia computadorizada, onde a reconstrução de propriedades físicas é realizada a partir de dados de sensores que captam informações provenientes do corpo do paciente. No campo petrolífero, esta ferramenta é de grande auxílio na identificação de possíveis campos de extração, onde dados provenientes de sensores que captam tremores sísmicos são utilizados para construir uma imagem tridimensional da jazida. O alerta sobre as falhas na camada de ozônio, escudo natural do planeta contra as perigosas radiações solares, veio de imagens elaboradas a partir de dados coletados em diversas estações climatológicas espalhadas pelo mundo. Em engenharia de alimentos é feito um estudo, principalmente em frutas, de dados coletados como temperatura e umidade, para se determinar o tempo de conservação e o dimensionamento da câmara de conservação.

Em transferência de calor, o problema direto é dito quando se tem o fluxo e se obtém o perfil de temperatura a partir das equações de difusão. O problema direto é classificado matematicamente como um problema bem posto quando satisfaz a três requisitos básicos: a existência de solução; a unicidade, isto é, uma solução única fixada às condições próprias do problema; e a estabilidade com relação a pequenas variações. Porém, o que ocorre geralmente é que a grandeza que gera tal fenômeno não se encontra facilmente disponível para se mensurar, o que leva os pesquisadores a abordarem o problema a partir de uma outra metodologia. Assim surgem os chamados problemas inversos, que pertencem a uma classe interessante e comum de problemas que são matematicamente ditos mal postos, pois não atendem aos três requisitos básicos mencionados anteriormente para problemas diretos. Mas esta classe traz alguns inconvenientes que tornam o trabalho de solução árduo, tais dificuldades são a sensibilidade a ruídos provenientes dos dados de entrada que degeneram a solução do fenômeno e as limitações de estabilidade do processo numérico de solução por razão de sua natureza iterativa.

Os problemas inversos em transferência de calor fazem o uso das temperaturas medidas experimentalmente e da equação de difusão de calor para estimar algum parâmetro térmico desconhecido, que pode ser as propriedades térmicas de um material, o coeficiente de transferência de calor por convecção ou o fluxo de calor. Um dos primeiros trabalhos de problemas inversos em transferência de calor foi apresentado por Stolz (1960), onde foi apresentado um método, que hoje é conhecido como método de Stolz, para estimar o fluxo de calor prescrito na superfície de esferas durante o processo de têmpera tendo a temperatura no interior da amostra como dado de entrada. Tal método também pode ser estendido para cilindros e chapas. Stolz (1960) assumiu que as propriedades termofísicas eram constantes, que não havia geração de calor interna e que o sistema poderia ser tratado como linear, assim pode-se utilizar o teorema de Duhamel para a elaboração do método. Este método apresentou bons resultados para uma gama de situações, fácil implementação e não exigia grande poder de processamento, mas havia problemas quando se apresentava ruídos nos dados e intervalo de tempo de amostragem pequeno, pois os fluxos calculados poderiam ir a infinito, não representando a realidade física do problema.

Foram propostas melhorias para corrigir essas limitações, que iniciaram em Beck (1962), Beck (1968), Beck (1970), Beck (1979), Beck *et al.* (1982) e terminaram com a publicação de um livro por Beck *et al.* (1985). Tais melhorias se basearam no fato de trazer para o tempo presente informações de tempos futuros, assim dessa forma pôde-se reduzir os efeitos dos ruídos nos dados de saída. Os autores utilizaram o teorema de Duhamel, a expansão em série de Taylor e a otimização por mínimos quadrados. Neste método, o fluxo atual é calculado utilizando os fluxos anteriores; considera-se também que os fluxos posteriores são nulos e assume-se um fluxo fictício, que pode ser constante, linear ou quadrático, sobre certa quantidade de tempos futuros. Este método apresenta robustez aos ruídos presentes nos dados, é de fácil implementação e não exige grande poder de processamento.

Uma outra técnica bastante usada na solução de problemas inversos é a chamada Regularização de Domínio Inteiro, que foi proposta por Tikhonov e Arsenin (1977), e sendo utilizada em diversos trabalhos, tais como Hensel (1991), Jarny *et al.* (1991), Ozisik (1993), Alifanov (1994), Ozisik e Orlande (2000), Woodbury (2003) e Colaço *et al.* (2006). Tal procedimento, também conhecido como Regularização de Tikhonov, utiliza o teorema de Duhamel e otimização por mínimos quadrados, mas há o acréscimo de um fator linear, que tem como função a atenuação de ruídos no sinal de temperatura. Este termo aditivo possui diferentes graus de filtragem, que são popularmente chamados de ordens. Esta técnica é de fácil implementação, mas exige a inversão de matrizes cujas dimensões são relacionadas com o número de pontos de amostragem, onde é requerido um grande poder de processamento para se efetuar os cálculos.

Os métodos Função Especificada e Regularização de Tikhonov utilizam um funcional a ser minimizado. Este funcional é a soma do quadrado das diferenças das temperaturas experimentais e calculadas. Porém, existem outras técnicas de problemas inversos que utilizam outras formas de minimização deste funcional. Há técnicas que utilizam derivadas, tais como Gradiente Conjugado, que foi utilizado em Alifanov (1974), Alifanov e Artyukhin (1975), Jarny *et al.* (1991) e Huang e Ozisik (1992), e métodos da métrica variável (Vanderplaats, 2005). Há também técnicas que não utilizam derivadas no processo de otimização, tais como Seção Áurea (Vanderplaats, 2005) e o método de minimização Brent (Brent, 1973). Mas também existem outras que baseiam em processos naturais, como por exemplo, Método de Recozimento Simulado (Corana *et al.*, 1987; Goffe *et al.*, 1994).

Neste trabalho, diferentes técnicas de solução de problemas inversos são implementadas e busca-se compará-las com relação ao tempo de execução, complexidade de resolução do algoritmo empregado e precisão dos resultados obtidos na estimação do fluxo aplicado às amostras de aço inox AISI 316 e de alumínio 5052. O modelo utilizado para resolver a equação de difusão de calor é o modelo unidimensional, um caso simplificado implementado no software *Ignis*. Para a obtenção das temperaturas experimentais as amostras são mantidas dentro de uma estufa de atmosfera controlada. Sua montagem é feita de forma simétrica, tendo uma superfície recebendo calor de um aquecedor resistivo e as demais são mantidas isoladas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Modelo Térmico 1D

Apresenta-se na Fig. 1 o esquema do problema térmico para o modelo unidimensional. Este caso simplificado foi considerado para estudo devido ao fato que os testes experimentais já haviam sido feitos para esta condição. Uma amostra homogênea de espessura L e temperatura inicial T_0 é sujeita a um fluxo de calor transiente e unidimensional, $\phi_1(t)$, na superfície frontal, isolada na superfície oposta ao aquecimento e nas laterais.

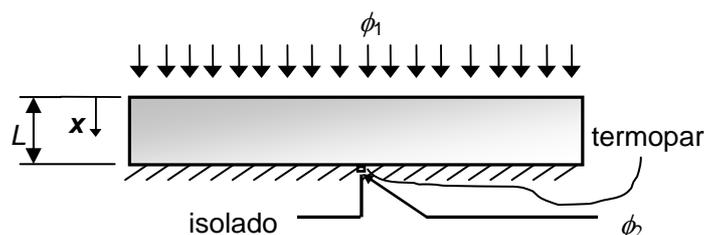


Figura 1. Amostra sujeita a um fluxo de calor imposto na superfície.

Sob essas condições, o problema térmico pode ser dado pela equação da difusão de calor:

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

sujeito às condições de contorno:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \phi_1(t) \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (3)$$

e à condição inicial:

$$T(x,0) = 0 \quad (4)$$

sendo λ e α , respectivamente, a condutividade térmica e a difusividade térmica. A solução do problema térmico dado pelas Eqs. (1) a (4) foi obtida numericamente, como já mencionado anteriormente.

2.2. Função Objetivo

Para a aplicação das técnicas de Problemas Inversos, a equação da difusão é calculada de acordo com as condições inicial e de contorno para o modelo térmico desejado. É aplicado o método de otimização para minimizar um funcional, também conhecido como função objetivo, F , entre as temperaturas experimentais, Y , e as temperaturas que o fluxo de calor induz, T , Eq. (5).

$$F = \sum_{i=1}^{nsens} \sum_{n=1}^{npt} [Y(x,t)_{i,n} - T(x,t)_{i,n}]^2 \quad (5)$$

sendo npt o número de pontos medidos e $nsens$ o número de sensores de temperatura.

3. APARATO EXPERIMENTAL

A bancada utilizada para determinar as propriedades do Aço Inox AISI 316 e do Alumínio 5052 está representada pela Fig. 2. A placa de aço inox possui as dimensões de 49,9 x 49,9 x 9,9 mm e a placa de alumínio 300 x 300 x 9,5 mm. O aquecedor resistivo de kapton que foi utilizado no aço inox apresenta uma resistência de 15 Ω e suas dimensões são de 50 x 50 x 0,2 mm, já o utilizado no alumínio apresenta uma resistência de 21 Ω e suas dimensões de 300 x 300 x 0,2 mm. O aquecedor resistivo de kapton é utilizado devido sua espessura ser muito fina, permitindo o aquecimento total 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 tensão foram medidos pelo multímetro Instrutherm MD-380, e os valores de corrente foram medidos pelo multímetro Minipa ET-2042C, ambos 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 das montagens 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 termopares do tipo K (30AWG) soldados por descarga capacitiva e calibrados usando um banho calibrador de temperatura Marconi MA 184 com uma resolução de $\pm 0,01$ °C. O termopar tipo K foi utilizado para medir a temperatura da placa em contato com o isopor. Estes termopares foram conectados 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.

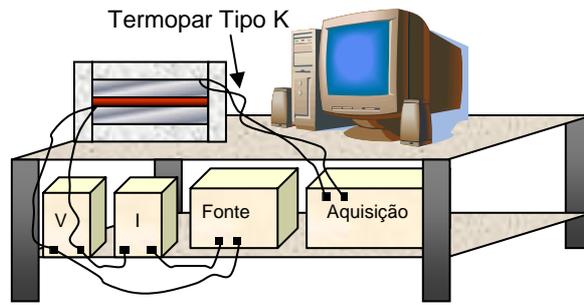


Figura 2. Esquema da bancada utilizada.

Nas Figuras 3a e 3b são mostrados em detalhes os esquemas de montagem para as amostras de aço inox AISI 316 e alumínio 5052.

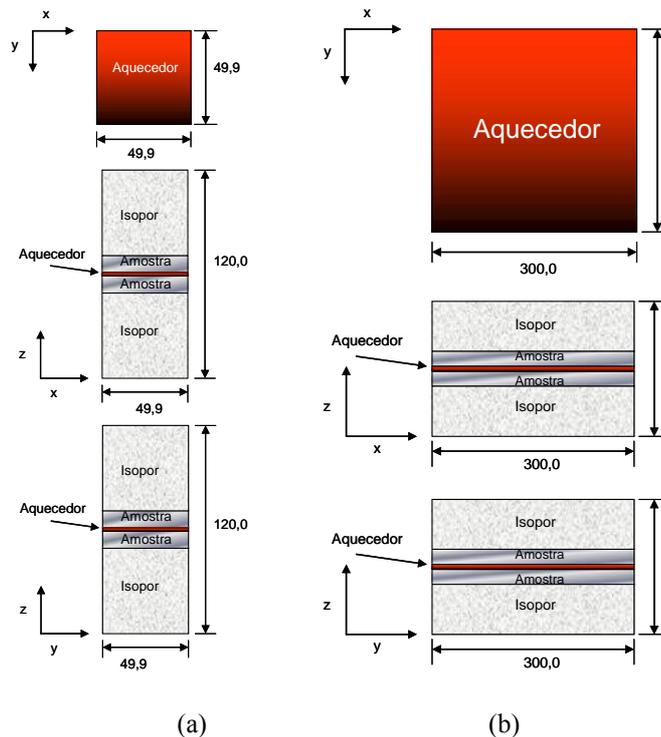


Figura 3. Esquema detalhado da montagem das amostras: a) Aço Inox AISI 316 e b) Alumínio 5052.

Nas Figuras 4a e 4b são exibidos o posicionamento dos termopares fixados nas amostras.

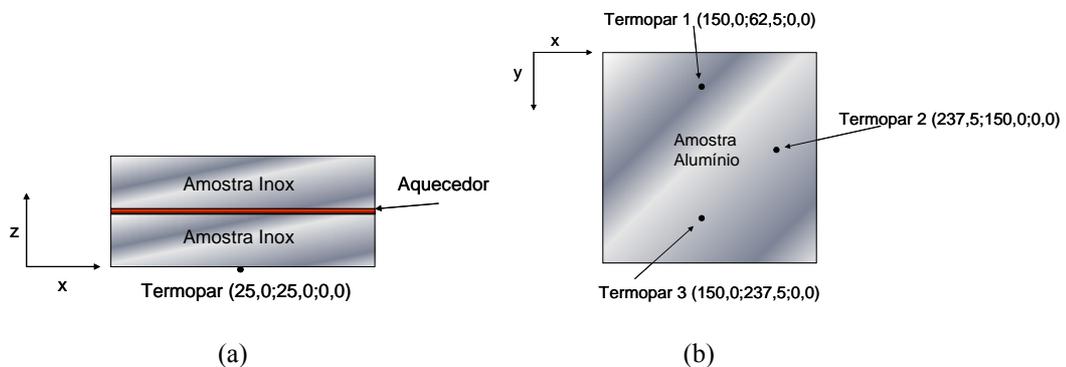


Figura 4. Esquema do posicionamento dos termopares nas amostras: a) Aço Inox AISI 316 e b) Alumínio 5052.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Aço Inox AISI 316

Para o Aço AISI 316 foram feitos 56 experimentos, onde em cada experimento foram coletados 2500 pontos de temperatura obtidos pelo sistema de aquisição. Foi empregado em cada experimento um fluxo de 2538 W/m^2 e o tempo de aquecimento foi de 160 s. Os valores de condutividade térmica $13,4 \text{ W/m.k}$ e da difusividade térmica $3,48 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ foram obtidos de Incropera *et al.*(2007). As Figuras 5a e 5b apresentam uma comparação entre o fluxo experimental e os fluxos estimados para um dos experimentos. Como em algumas técnicas os resultados oscilaram bastante, optou-se por apresentar em separado a comparação entre os fluxos experimental e estimados. Assim, na Fig. 5a é apresentada uma comparação do fluxo real com as técnicas Regularização de Tikhonov e Função Especificada, e na Fig. 5b compara-se o fluxo as técnicas Brent, Seção Áurea, Recozimento Simulado, DFP e BFGS. Observa-se que somente as técnicas Regularização de Tikhonov e Função Especificada apresentaram resultados satisfatórios para a estimação do fluxo. O mesmo comportamento foi apresentado para os outros 55 experimentos restantes.

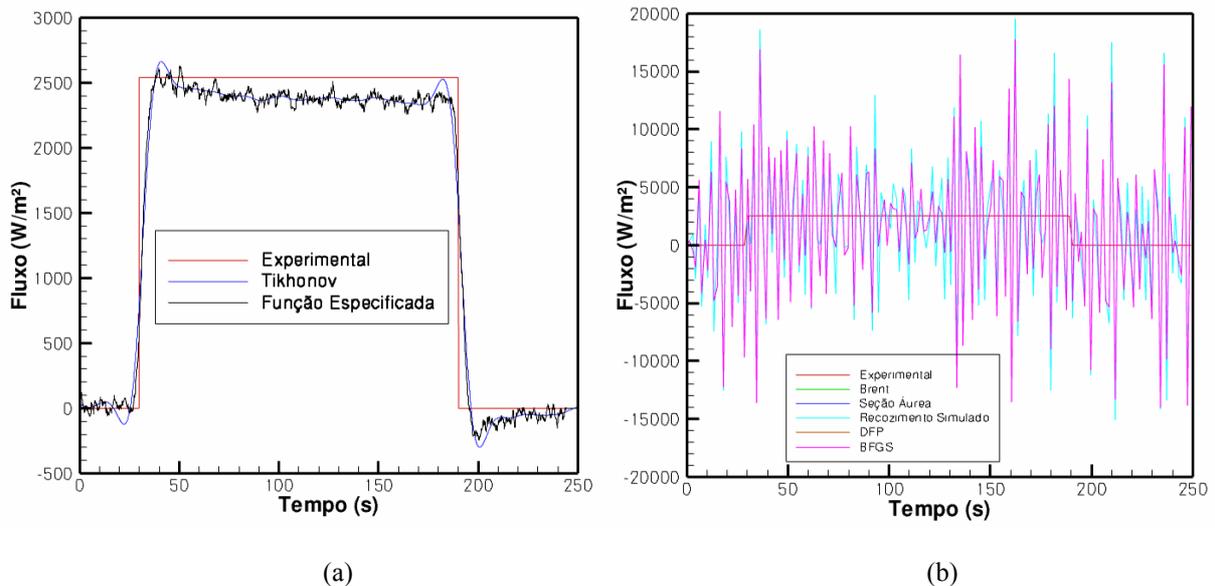


Figura 5. a) Comparação entre fluxo experimental e as técnicas Função Especificada e Regularização de Tikhonov e b) Comparação de fluxo experimental com as demais técnicas.

As Figuras 6a e 6b apresentam uma comparação entre a temperatura experimental e as temperaturas obtidas pelo problema direto utilizando os fluxos estimados mostrados anteriormente. Pode-se observar que todas as técnicas inversas obtiveram uma boa concordância com a temperatura experimental.

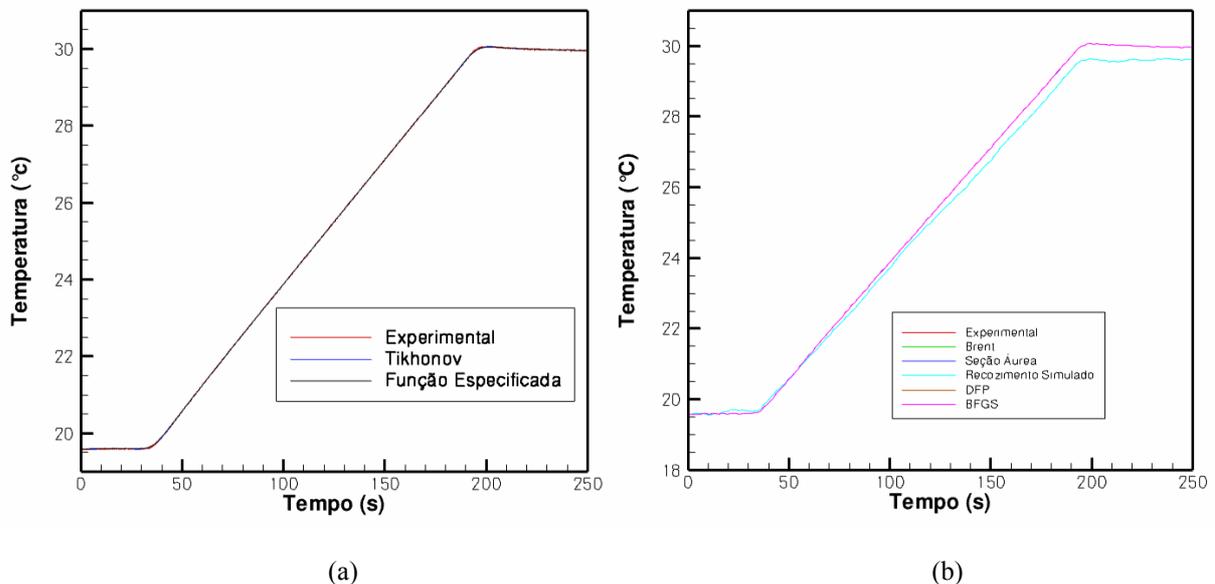


Figura 6. a) Comparação entre temperatura experimental e as calculadas pelas técnicas Função Especificada e Regularização de Tikhonov e b) Comparação da temperatura experimental com as das demais técnicas.

Nas Figuras 7a e 7b são apresentados os resíduos entre a temperatura experimental e as temperaturas calculadas. A Figura 7a mostra que as técnicas Tikhonov e Função Especificada obtiveram diferenças inferiores a 0,2% em relação à temperatura experimental. A Figura 7b mostra que as demais técnicas obtiveram diferenças inferiores a 0,5% da temperatura experimental, somente a técnica Recozimento Simulado apresentou uma diferença acima de 1%, mas mesmo assim esta técnica apresentou um resultado satisfatório para a temperatura.

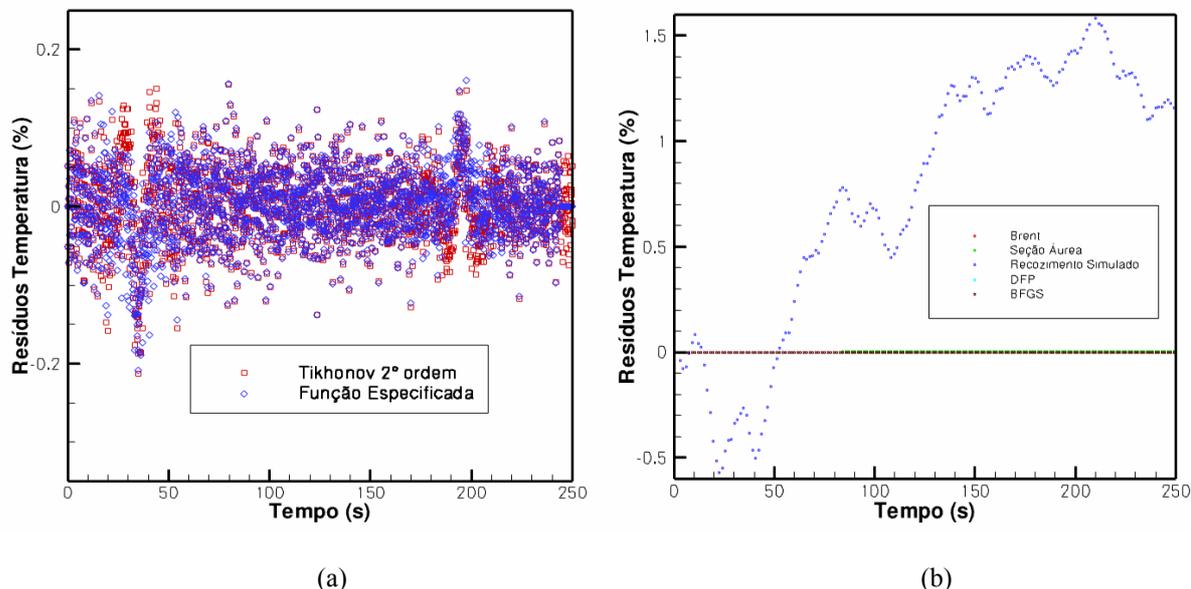


Figura 7. a) Resíduos entre temperatura experimental e as calculadas pelas técnicas Função Especificada e Regularização de Tikhonov e b) Resíduos entre temperatura experimental e as demais calculadas.

A Tabela 1 mostra o tempo de processamento gasto em cada técnica. Para cada técnica, houve 5 execuções do software *Ignis*, o menor tempo gasto nos cálculos é exibido nesta tabela. Para a técnica Regularização de Tikhonov foi usado um parâmetro de regularização, pr , igual a $2,5 \times 10^{-3}$ e para o método da função especificada foi usado o número de tempos futuros, r , igual a 60. Analisando os valores obtidos para o tempo de processamento, observa-se que as técnicas Seção Áurea e Função especificada apresentaram os melhores resultados. Todavia, pode-se concluir que o tempo gasto para todas as técnicas ficou abaixo de 60 s, exceto para a de Recozimento Simulado que é uma técnica heurística que consome um tempo de processamento elevado.

Tabela 1. Tempo de processamento gasto em cada técnica inversa para o Aço AISI 316.

Técnica Inversa	Tempo Gasto (s)
Seção Áurea	0,39
Função Especificada ($r = 60$)	0,41
Brent	1,38
BFGS	10,64
DFP	11,12
Tikhonov ($pr = 2,5 \times 10^{-3}$)	41,22
Recozimento Simulado	322,26

4.2. Alumínio 5052

Para o Alumínio 5052 foram feitos 51 experimentos, onde em cada experimento foram coletados 1260 pontos de temperatura obtidos pelo sistema de aquisição. Foi empregado em cada experimento um fluxo de 254 W/m^2 e o tempo de aquecimento foi de 900 s. A condutividade térmica é de 138 W/m.k e a difusividade térmica de $2,36 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (MatWeb, 2010). Neste caso como a amostra é maior, mais sensores (três) de temperatura foram usados. Com isso pretende-se fazer uma análise usando mais sensores de temperatura com o objetivo de melhorar os resultados estimados para o fluxo de calor. As Figuras 8a e 8b apresentam comparações entre o fluxo experimental e os fluxos estimados para um dos experimentos realizados. Desta vez a técnica Regularização de Tikhonov não foi usada, pois ainda não foi implementado o uso de mais de um sensor para esta técnica. O uso de mais de um sensor para este caso não apresentou diferença em relação aos resultados apresentados para o caso anterior. Embora, para algumas técnicas de otimização ocorreram melhoras significativas para o valor do fluxo estimado. No entanto, o fluxo ainda continua oscilando. A

diferença apresentada para o método da Função Especificada deve-se ao fato da dificuldade de obtenção dos valores das propriedades termofísicas para esta amostra. Este problema será corrigido mais adiante em um trabalho que está sendo desenvolvido para a determinação destas propriedades deste material. Nas Figuras 9a e 9b são mostradas uma comparação para uma das temperaturas experimentais e as temperaturas obtidas por problema direto a partir dos fluxos estimados mostrados anteriormente. Para as outras temperaturas os mesmos resultados foram apresentados. Somente a técnica do Recozimento Simulado não apresentou concordância com a temperatura experimental. Isto pode ser observado melhor nas Figuras 10a e 10b onde são apresentados os resíduos.

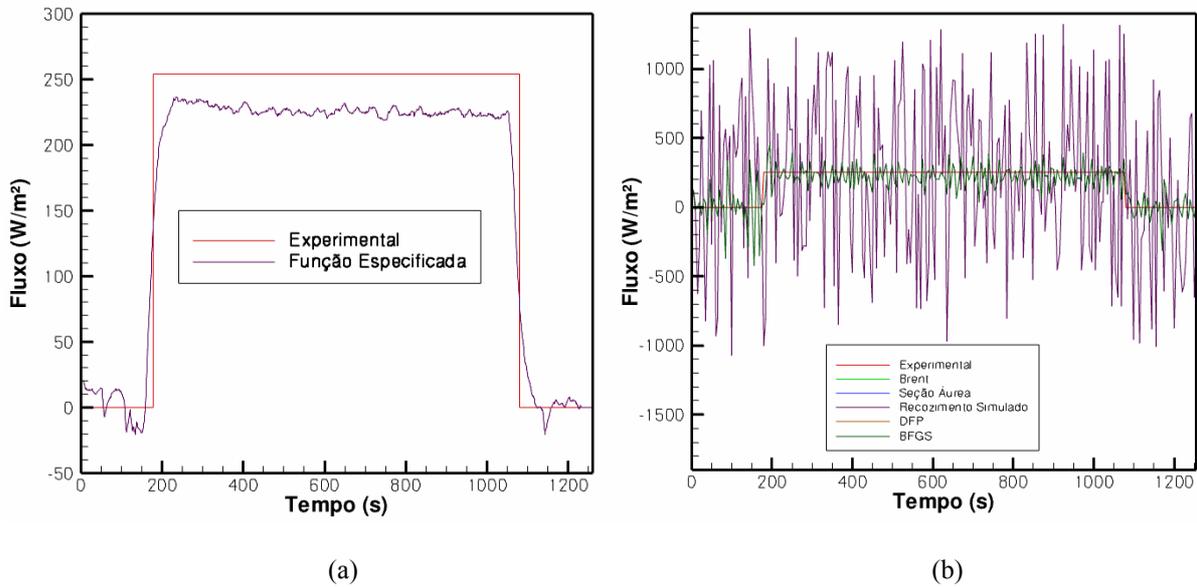


Figura 8. a) Comparação entre fluxo experimental e a técnica Função Especificada e b) Comparação de fluxo experimental com as demais técnicas.

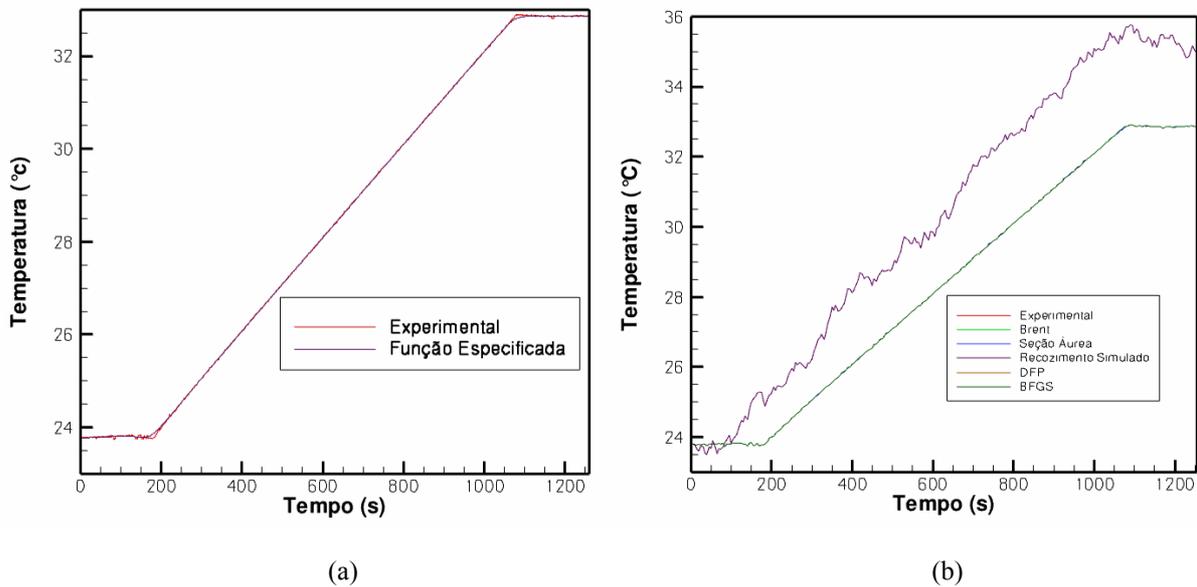


Figura 9. a) Comparação entre temperatura experimental e as calculadas pelas técnicas Função Especificada e b) Comparação da temperatura experimental com as das demais técnicas.

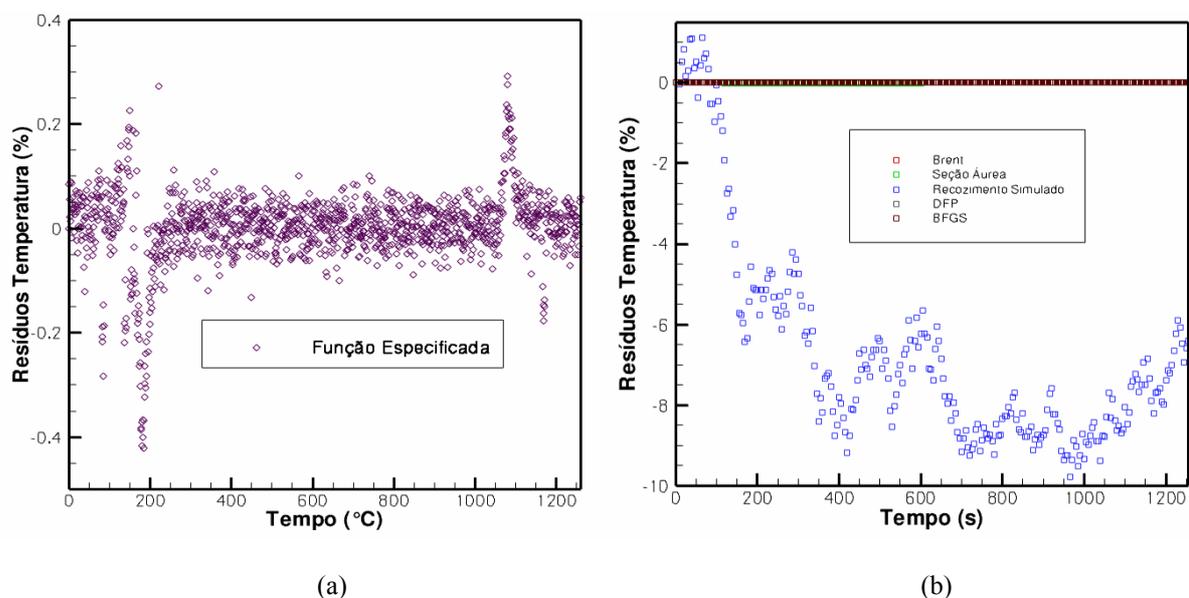


Figura 10. a) Resíduos entre temperatura experimental e as calculadas pelas técnicas Função Especificada e b) Resíduos entre temperatura experimental e as demais calculadas.

Na Tabela 2 o tempo de processamento é apresentado para as técnicas usadas para este caso. Mais uma vez todas as técnicas apresentaram resultados satisfatórios com o tempo ficando abaixo de 60 s. A técnica Recozimento Simulado que mais uma vez foi a que apresentou o pior resultado.

Tabela 2. Tempo de processamento gasto em cada técnica inversa para o Alumínio 5052.

Técnica Inversa	Tempo Gasto (s)
Brent	0,06
Função Especificada ($r = 30$)	0,13
Seção Áurea	0,18
BFGS	2,34
DFP	2,47
Recozimento Simulado	158,21

5. CONCLUSÕES

Uma comparação entre as técnicas inversas foi apresentada neste trabalho. As técnicas Regularização de Tikhonov e Função Especificada foram as que apresentaram os melhores resultados para a estimação do fluxo de calor. As demais técnicas não foram boas para estimar o fluxo de calor, isto é devido à sensibilidade que estas técnicas apresentam aos ruídos no sinal de temperatura. Já para o cálculo da temperatura a partir do fluxo estimado, todas as técnicas apresentaram bons resultados. Somente a técnica de Recozimento Simulado que apresentou uma diferença maior. Com relação ao tempo de processamento as técnicas Seção Áurea, Função Especificada e Brent foram as melhores, mas para todas o tempo de processamento não foi elevado. Com relação ao uso de mais de um sensor não foi apresentada uma melhora nos resultados. Entretanto, o uso de mais de um sensor fica melhor representado quando do uso de um modelo bi ou tridimensional, onde existe diferença de sensibilidade entre os pontos de temperatura. No caso unidimensional, as temperaturas são as mesmas variando em torno da incerteza do sensor de medição de temperatura. Um trabalho aplicando estas técnicas em um problema tridimensional encontra-se em desenvolvimento.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, FAPEMIG e CAPES pelo suporte financeiro. O aluno Cristiano Pedro da Silva agradece ao CNPq pela bolsa de mestrado.

7. REFERÊNCIAS

Alifanov, O. M., 1974, "Solution of an Inverse Problem of Heat Conduction by Iteration Methods", Journal of Engineering Physics, Vol. 26, No. 4, pp. 471-476.

- Alifanov, O. M. and Artyukhin, E. A., 1975, "Regularized Numerical Solution of Nonlinear Inverse Heat Conduction Problem", *Journal of Engineering Physics*, Vol. 29, No. 1, pp. 934-938.
- Alifanov, O. M., 1994, "Inverse Heat Transfer Problems", Springer-Verlag, New York, 280 p.
- Beck, J. V., 1962, "Calculation of Surface Heat Flux from an Internal Temperature History", ASME Paper 62-HT-46.
- Beck, J. V., 1968, "Surface Heat Flux Using an Integral Method", *Nuclear Engineering Design*, Vol. 7, pp. 170-178.
- Beck, J. V., 1970, "Nonlinear Estimation Applied to the Nonlinear Inverse Heat Conduction Problem", *Internal Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 13, pp. 703-715.
- Beck, J. V., 1979, "Criteria for Comparison of Methods of Solution of the Inverse Heat Conduction Problem", *Nuclear Engineering Design*, Vol. 53, pp. 11-22.
- Beck, J. V., Blackwell, B. and Clair, C. R. St. Jr., 1982, "Efficient Sequential Solution of the Nonlinear Inverse Heat Conduction Problem", *Numerical Heat Transfer*, Vol. 5, pp. 275-286.
- Beck, J. V., Blackwell, B. and Clair, C. R. St. Jr., 1985, "Inverse Heat Conduction: Ill-posed Problems", Wiley, New York, 308 p.
- Brent, R., 1973, "Algorithms for Minimization Without Derivatives", Prentice-Hall, 224 p.
- Colaço, M. J., Orlande, H. R. B., and Dulikravich, G. S., 2006, "Inverse and Optimization Problems in Heat Transfer", *Journal of Brazilian Society of Mech. Sci. & Eng.*, Vol. XXVIII, No. 1, pp. 1-24.
- Corana, A., Marchesi, M., Martini, C. and Ridella, S., 1987, "Minimizing Multimodal Functions of Continuous Variables with the Simulated Annealing Algorithm", *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol. 13, pp. 262-280.
- Goffe, W. L., Ferrier, G. D. and Rogers, J., 1994, "Global Optimization of Statistical Functions with Simulated Annealing", *Journal of Econometrics*, Vol. 60, pp. 65-99.
- Hensel, E., 1991, "Inverse Theory and Applications for Engineers", Prentice Hall, New Jersey, 352 p.
- Huang, C. H. and Ozisik, M. N., 1992, "Inverse Problem of Determining Unknown Wall Heat Flux in Laminar Flow Trough a Parallel Plate Duct", *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 21, pp. 55-70.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. (2007), "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*", John Wiley & Sons, 6th ed., USA, 997 p.
- Jarny, Y., Ozisik, M. N., and Bardou, J. P., 1991, "A General Optimization Method Using Adjoint Equation for Solving Multidimensional Inverse Heat Conduction", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, No. 11, pp. 2911-2919.
- MatWeb, *Aluminium 5052*, Disponível em: www.matweb.com, Data de acesso: 10/03/2010.
- Ozisik, N. M., 1993, "Heat Conduction", 2nd ed., Wiley, New York, 716 p.
- Ozisik, M. N., and Orlande, H. R. B., 2000, "Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications", Taylor and Francis, New York, 330 p.
- Stolz, G. Jr., 1960, "Numerical Solutions to an Inverse Problem of Heat Conduction for Simple Shapes", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 82, pp. 20-26.
- Tikhonov, A. N., and Arsenin, V. Y., 1977, "Solutions of Ill-Posed Problems", V. H. Winston and Sons, Washington, DC, 272 p.
- Vanderplaats, G. N., 2005, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: With Applications", McGraw-Hill, New York, 449 p.
- Woodbury, K., 2003, "Inverse Engineering Handbook", CRC Press, Boca Raton, 480 p.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

COMPARISON OF INVERSE TECHNIQUES IN HEAT TRANSFER

Cristiano Pedro da Silva, gr9942@gmail.com

Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva, alfsilva@unifei.edu.br

Sandro Metrevelle de Lima e Silva, metrevel@unifei.edu.br

Federal University of Itajubá – UNIFEI, Institute of Mechanical Engineering – IEM, Heat Transfer Laboratory – LabTC, BPS Av., 1303, Pinheirinho District, ZIP code 37500-903, Box-Postal 50, Itajubá, MG, Brazil

***Abstract.** In heat transfer, inverse problems allow the estimation of heat flux on the sample surface. This estimation is made of experimental temperatures obtained at different positions on the sample. In this work the goal is to study numerically the process of heat transfer in one-dimensional problems for AISI 316 stainless steel and aluminum 5052 samples using various inverse problems techniques. For this Ignis software was developed to solve the three-dimensional transient diffusion equation. In this software the diffusion equation in 3D Cartesian coordinates was solved using finite differences in space and implicit Euler method for time discretization. The software Ignis also has implemented the following techniques: Golden Section, Simulated Annealing, Brent, Specified Function, and Tikhonov Regularization and Variable Metric. In this paper these techniques are compared with respect to analysis of accuracy and processing time to estimate the heat flux. The methodology is validated with controlled laboratory experiments. The samples are subjected to heat flux on the surface and the others are isolated. The temperature sensors are fixed by capacitive discharge on the opposite surface of the heat. A resistive heater is used to generate the constant heat flux that is obtained from a symmetrical assembly. Temperature values are obtained using type K thermocouples. The numerical results are compared with experimental values and also with the literature. The techniques specified function and Tikhonov regularization showed better results when compared with other methods.*

***Keywords:** inverse problem, heat conduction, optimization, heat flux estimation, numerical and experimental methods.*