

ESTIMATIVA DE FLUXO TÉRMICO TRANSIENTE ATRAVÉS DE UMA FORMULAÇÃO EXPLÍCITA E DA TERMOGRAFIA POR INFRAVERMELHO

Emerson de Lima Sanches, emerson_llpsanches@hotmail.com¹

Luiz Alberto da Silva Abreu, abreu.l@gmail.com¹

Diego Campos Knupp, diegoknupp@gmail.com¹

Antônio José da Silva Neto, ajs_neto@uol.com.br¹

Fabricio da Silva Mascouto, fabricio_mascouto@hotmail.com¹

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico (IPRJ/UERJ) – Rua Bonfim, nº 25, Vila Amélia, Nova Friburgo, RJ

Resumo: O presente artigo tem como principal objetivo a estimativa de fluxos térmicos transientes aplicados a um dos contornos de uma amostra termicamente fina, através da solução dos problemas direto e inverso associados e da incorporação de dados térmicos reais obtidos experimentalmente através da termografia por infravermelho. O modelo adotado equivale a um problema de transferência de calor por condução em regime transiente e sem variação espacial, que possibilita a aplicação de uma metodologia explícita de solução do problema inverso. Além disso, devido ao caráter mal-posto dos problemas inversos, é realizada uma análise da influência da regularização dos dados experimentais nos resultados obtidos.

Palavras-chave: Transferência de Calor, Problemas Inversos, Termografia por Infravermelho, Técnicas de Regularização.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento do comportamento térmico de sistemas e processos tem se tornado cada vez mais crucial para inúmeros objetivos nas mais diversas áreas (Eberhart e Shitzer, 2012). Em especial, a determinação da magnitude e localização de fontes de calor e de fluxos térmicos é de extrema importância para a solução de problemas industriais, médicos e científicos (Marinetti et al, 2002; Renault et al., 2010; Agnelli et al., 2011), bem como para o desenvolvimento de novas tecnologias. Como exemplo, destaca-se as constantes dificuldades relacionadas ao superaquecimento de máquinas, peças automotivas e componentes eletroeletrônicos (Chen e Hsu, 2007; Yang et al, 2014).

Aliadas às teorias da transferência de calor, os princípios de problemas inversos desempenham um papel fundamental na resolução matemática-computacional de determinados problemas térmicos. Os problemas inversos são classificados como sendo problemas mal postos, pois não obedecem simultaneamente às três propriedades definidas por Hadamard (existência, unicidade e dependência suave com relação aos dados de entrada), e existem diversos métodos de solução dos mesmos (Campos Velho, 2001).

Em meio a esses conceitos, outra importante ferramenta que auxilia na reconstrução de fontes térmicas, internas ou externas, é a regularização (Renault et al., 2008). Apesar das tecnologias existentes para aquisição de dados, como o caso da termografia por infravermelho (Silva, 2007), a presença de ruídos é inerente aos procedimentos experimentais e a sua propagação devido ao comportamento mal-posto dos problemas inversos é inevitável (Aguirre, 1997; Muniz, 1999). Com isso, técnicas matemáticas são utilizadas para a transformação e controle dos dados de entrada, priorizando os mais relevantes sem que haja a perda de informação.

Devido à grande relevância dos temas citados, o trabalho em questão tratará, basicamente, da estimativa de fluxos térmicos impostos no contorno de uma determinada amostra termicamente fina através de uma metodologia explícita desenvolvida recentemente (Knupp e Abreu, 2016) para solução do problema inverso associado, bem como através de um procedimento de regularização de dados térmicos, obtidos experimentalmente pela termografia de infravermelho. O respectivo modelo físico-matemático é baseado na equação do calor exclusivamente transiente, sem variação térmica em qualquer direção espacial, obtida a partir de uma formulação de parâmetros concentrados.

2. DESENVOLVIMENTO E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

2.1. Problema Direto

Considere uma placa cuja uma das faces, $z=0$, recebe um fluxo térmico transiente, genericamente representado por $q(t)$, enquanto a face oposta, $z=L_z$, encontra-se exposta ao ambiente, à temperatura T_∞ , trocando calor por convecção e radiação, sob condições naturais e homogêneas, com um coeficiente efetivo de troca térmica h conhecido, como ilustra a representação esquemática da Fig. 1.

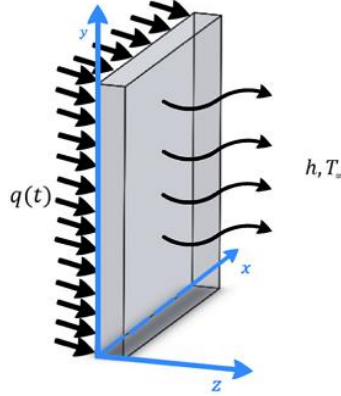


Figura 1. Representação esquemática do problema físico

De uma forma geral, o problema abordado pode ser inicialmente modelado pela equação da difusão térmica em coordenadas cartesianas sem termo fonte e propriedades térmicas constantes (Incropera et al., 2014), dada por:

$$\rho c_p \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

onde ρ é a massa específica, c_p o calor específico e k é a condutividade térmica do material da amostra. Além da equação do calor, o problema como proposto acima necessita de seis condições de contorno e uma condição inicial.

Considerando uma formulação via parâmetros concentrados, obtém-se um problema em regime transiente e sem variação espacial (0D). Para isso, adota-se um fluxo imposto uniforme com relação as direções x e y , dependente exclusivamente do tempo ($q(t)$). Além disso, considera-se que a troca de calor pelas bordas menores ocorre, apesar das respectivas áreas serem relativamente pequenas, e com o mesmo coeficiente de troca térmica h adotado para a condição de contorno na superfície maior.

Assim, com as considerações gerais indicadas e com a utilização do método *Lumped Analysis* (ou parâmetros concentrados), tem-se o seguinte modelo final simplificado:

$$\begin{cases} \rho c_p \frac{dT_m(t)}{dt} = \frac{q(t)}{L_z} - h \left(\frac{2}{L_x} + \frac{2}{L_y} + \frac{1}{L_z} \right) [T_m(t) - T_\infty] \\ T_m(t=0) = T_0 \end{cases} \quad (2)$$

sendo $T_m(t)$ a temperatura média da amostra ao longo do tempo e T_0 a temperatura inicial da amostra.

2.2. Problema Inverso e Regularização

A solução do problema inverso associado ao modelo direto apresentado anteriormente consiste na determinação do fluxo térmico (causa) a partir das temperaturas obtidas experimentalmente pela termografia de infravermelho (efeito). O modelo físico-matemático representado pela Eq. (2) possibilita a utilização da metodologia explícita (Knupp e Abreu, 2016) para solução inversa e consequente obtenção da seguinte expressão para função fluxo que se deseja estimar:

$$q(t) = \rho c_p L_z \frac{dT_m(t)}{dt} + h \left(\frac{2L_z}{L_x} + \frac{2L_z}{L_y} + 1 \right) [T_m(t) - T_\infty] \quad (3)$$

Considerando que os dados reais de temperatura são obtidos discretamente ao longo do tempo (com N_t medidas), e representados por T_{exp} , pode-se aplicar à Eq. (3) uma aproximação de diferenças finitas, do tipo centrada com três pontos, obtendo a seguinte expressão aproximada:

$$q^n = \rho c_p L_z \left(\frac{T_{exp}^{n+1} - T_{exp}^{n-1}}{2\Delta t} \right) + h \left(\frac{2L_z}{L_x} + \frac{2L_z}{L_y} + 1 \right) (T_{exp}^n - T_\infty), \quad \text{com } n = 2, 3, \dots (N_t - 1) \quad (4)$$

Assim, o modelo da Eq. (4) é capaz de calcular os valores discretos do fluxo térmico para cada instante de tempo t_n , tanto a partir de dados experimentais reais quanto simulados. Porém, o mesmo possui um comportamento mal posto, e pequenas alterações nos dados experimentais podem acarretar grandes mudanças nos valores estimados, prejudicando os resultados buscados.

Com intuito de minimizar a amplificação dos erros contidos nos dados experimentais, adota-se um procedimento de regularização dos mesmos (Knupp e Abreu, 2016) antes de aplicá-los ao modelo inverso descrito na Eq. (4). Tal procedimento consiste, basicamente, na expansão de T_{exp} em termos de autofunções $\psi(t)$, a saber:

$$T_{Reg} = \sum_{i=1}^{N_r} \frac{\bar{T}_{exp,i} \psi_i(t)}{N_i}, \quad \text{sendo} \quad \begin{cases} N_i = \int_0^{t_f} (\psi_i(t))^2 dt \\ \bar{T}_{exp,i} = \int_0^{t_f} \psi_i(t) T_{exp}(t) dt \end{cases} \quad (5)$$

sendo T_{Reg} os dados experimentais regularizados. Essas autofunções podem ser calculadas através da solução do seguinte problema básico de Sturm-Liouville:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \psi_i(t)}{dt^2} + \mu_i^2 \psi_i(t) = 0 \\ \psi_i'(t) \Big|_{t=0, t=t_f} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

A ordem de truncamento do somatório da Eq. (5), N_r , será crucial para a obtenção de um bom resultado, tornando a regularização significativa ou não. Para isso, utiliza-se o princípio da discrepância, que, basicamente, compara a variância dos dados experimentais, σ_{exp}^2 , e a variância dos dados regularizados com relação aos dados experimentais, σ_{reg}^2 , dada pela seguinte expressão:

$$\sigma_{reg}^2 = \frac{1}{N_t} \sum_{n=1}^{N_t} (T_{reg}^n - T_{exp}^n)^2 \quad (7)$$

Logo, calculadas as autofunções e verificada a ordem de truncamento a ser utilizada, pode-se substituir os dados experimentais, T_{exp} , pelos dados experimentais regularizados, T_{Reg} , na Eq. (4).

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para a estimativa dos fluxos térmicos reais, há a necessidade de aquisição de dados térmicos experimentais. O principal equipamento necessário à obtenção desses dados é a câmera termográfica, disponível no Laboratório de Experimentação e Simulação Numérica em Transferência de Calor e Massa (LEMA-IPRJ/UERJ), que tem seu funcionamento fundamentado no princípio de que qualquer corpo acima da temperatura do zero absoluto emite radiação infravermelha e a intensidade dessa emissão está diretamente relacionada à temperatura do corpo.

Um aparato experimental foi montado para a realização dos experimentos necessários, como ilustra a Fig. 2 a seguir, com os equipamentos disponíveis no LEMA e destacados na imagem como: (1) Desktop Dell; (2) Datalogger Agilent 34972a; (3) Fonte de Corrente Contínua Minipa MPL-1303M; (4) Câmera Termográfica Flir A645sc (640x480 pixels de resolução); (5) Mesa Elevadora ME1 Optron (126x200 mm); (6) Mesa Óptica Optron (600x800 mm); (7) Conjunto de duas placas de alumínio (40x40x2 mm) e uma resistência elétrica; (8) Suporte bilateral para fixação do conjunto.

Além da câmera termográfica, e todos os outros equipamentos necessários ao experimento, outra importante ferramenta é o software Flir ResearchIR, em destaque no computador da bancada experimental (Fig. 2), no qual são realizadas as análises, manipulações e as importações finais, numéricas e gráficas.



Figura 2. Aparato Experimental

A termografia por infravermelho é uma ferramenta para medição de temperatura amplamente empregada em aplicações que exijam nenhuma interferência, sendo este, assim, um método não intrusivo. Para o problema aqui abordado, utiliza-se este método para a obtenção da temperatura média da amostra, submetida ao aquecimento espacialmente uniforme, ao longo do tempo. Cabe ressaltar que os experimentos são realizados com um conjunto de duas amostras e uma resistência, em um formato tipo “sanduíche”, e a análise é feita em apenas uma das amostras, garantindo, assim, a equivalência com o modelo descrito.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Formuladas as metodologias diretas e inversas, pode-se aplicá-las, então, à solução computacional dos problemas abordados, utilizando códigos desenvolvidos no software de computação simbólica *Wolfram Mathematica 11*, instalado em um notebook Dell com processador Intel Core™ i7-7500U, 16GB de memória RAM, SSD de 128GB e SO Windows 10.

São necessárias algumas etapas para a correta obtenção de uma metodologia computacional que seja capaz de resolver os modelos analisados com os menores erros associados possíveis. Assim, entre outras etapas, faz-se necessária, inicialmente, a validação do código com o uso de dados experimentais simulados.

Tanto para os dados simulados quanto para os dados reais, utilizou-se as propriedades do alumínio em uma amostra quadrada termicamente fina, cujos lados e a espessura medem 40mm e 2mm, respectivamente. Dentre as propriedades desse material, destacam-se a massa específica $\rho = 2702 \text{ kg} / \text{m}^3$, o calor específico $c_p = 903 \text{ J} / \text{kgK}$ e a condutividade térmica $k = 237 \text{ W} / \text{mK}$. Além disso, adotou-se um tempo final $t_f = 1790 \text{ s}$, com temperaturas registradas em um intervalo $\Delta t = 5 \text{ s}$, e uma temperatura ambiente $T_\infty \cong 22,7^\circ\text{C}$.

Outro parâmetro crucial para o modelo descrito na Seção 2 é o coeficiente de troca térmica por convecção h . Para estima-lo com maior precisão, adotou-se, a partir do modelo descrito pela Eq. (2), um modelo físico-matemático 0D em regime permanente com fluxo térmico constante e uniforme q_{Max} . Neste caso, a derivada primeira com relação ao tempo vai a zero quando se atinge o estado estacionário ($t_f \rightarrow \infty$), resultando na seguinte expressão:

$$h = \frac{q_{Max}}{T_m - T_\infty} \quad (8)$$

Com o modelo descrito pela Eq. (8), realizou-se três experimentos independentes, com a amostra de alumínio submetida a três valores de q_{Max} , para aquisição, via termografia por infravermelho, das temperaturas T_m nos respectivos regimes permanentes. Por fim, calculados os valores de h referentes a cada um dos testes, obteve-se, através de uma média aritmética, um coeficiente de troca térmica final $h \cong 24,8 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$, que é adotado como conhecido em todos os casos.

Para a etapa de validação, simulou-se experimentos cuja amostra estaria submetida a um fluxo de perfil quadrado (“liga-desliga”) e módulo máximo $q_{Max} \cong 549,9 \text{ W} / \text{mK}$ (Fig. 3). Dentre os casos avaliados, serão apresentados os resultados obtidos para dois diferentes níveis de ruído introduzidos ao modelo para geração dos dados sintéticos, com intuito de comprovar sua eficácia até mesmo em casos cujos erros associados sejam muito acima do que se espera. A Fig. 4 apresenta os perfis de temperatura ao longo do tempo gerados para cada nível de ruído utilizado.

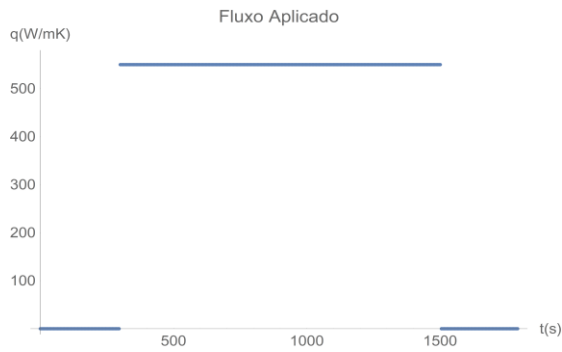


Figura 3. Fluxo imposto no contorno da amostra

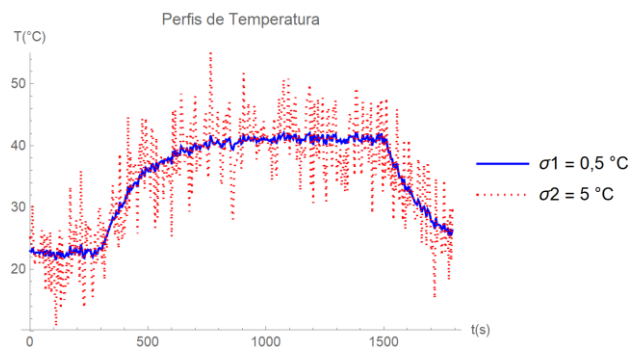


Figura 4. Perfis de temperatura simulados

As Figuras 5 e 6 apresentam os fluxos estimados para os níveis de ruído adotados, destacando as curvas para três quantidades específicas de termos no somatório das expansões do processo de regularização dos dados experimentais.

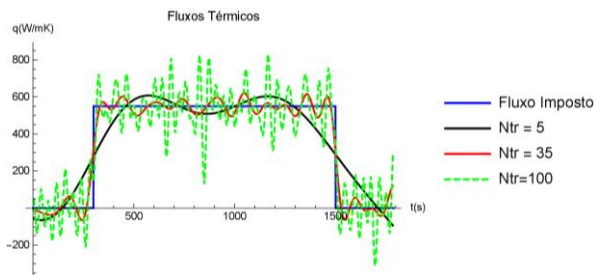


Figura 5. Fluxos imposto e estimado para $\sigma = 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

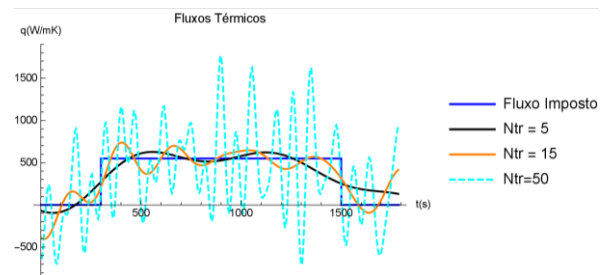


Figura 6. Fluxos imposto e estimado para $\sigma = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

O número de termos utilizados para os resultados acima foi escolhido de forma a abranger os principais casos limites, baseado na análise do princípio da discrepância para cada um dos casos. De acordo com os gráficos acima, percebe-se que, para ambos os ruídos sintéticos, a regularização foi extremamente importante para melhorar as estimativas e possibilitar que as mesmas estivessem dentro de uma faixa esperada, com um perfil em média próximo ao desejado e com uma oscilação relativamente controlada.

Para ambos os casos, percebe-se, claramente, que a utilização de uma ordem de truncamento igual a 5 termos é insuficiente e resulta em perfis longe do esperado. Em contrapartida, é notório que uma grande quantidade de termos na série acarreta em perfis com muitas oscilações e picos muito distantes do valor esperado, já que, assim, o comportamento mal posto devido ao processo de inversão não é suavizado.

A utilização de dados sintéticos com menos ruídos (Fig. 5) permite o uso de uma maior ordem de truncamento para a obtenção do melhor resultado se comparado ao caso mais ruidoso (Fig. 6). Isso já era esperado, pois, de acordo com o princípio da discrepância, quanto maiores forem os erros associados, menos termos deverão ser utilizados a fim de minimizar a propagação de erros durante a solução do problema inverso.

Validados o código e a metodologia utilizada, pode-se aplicar os dados térmicos reais para a estimativa de um fluxo imposto experimentalmente no contorno da amostra. Tal fluxo é aplicado por uma resistência elétrica, cuja corrente é fornecida por uma fonte externa contínua, e teoricamente apresenta um perfil parecido com o utilizado na validação.

Os dados experimentais obtidos via termografia apresentam um perfil bem definido de baixa oscilação, com um desvio padrão $\sigma_{Exp} \cong 0,073 \text{ }^{\circ}\text{C}$, como mostra a Fig. 7. Apesar disso, os mesmos devem ser regularizados, e a escolha da melhor ordem de truncamento é feita pela análise do princípio da discrepância, representada pela Fig. 8.

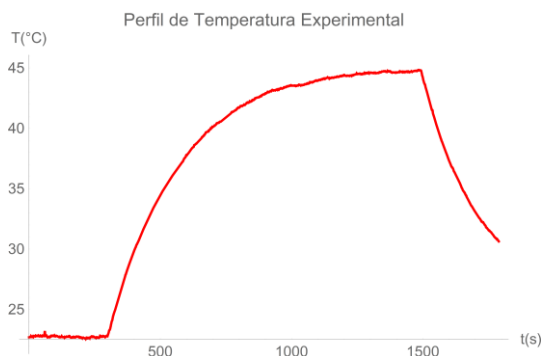


Figura 7. Perfil de temperatura experimental

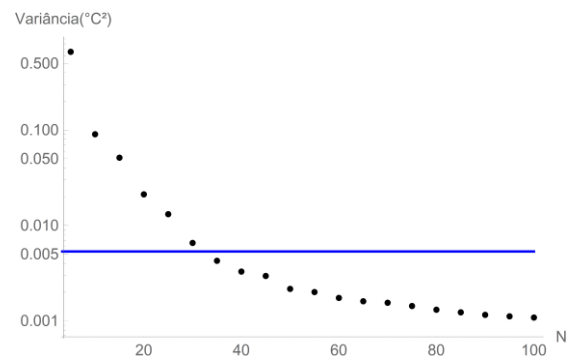


Figura 8. Princípio da discrepância

É importante salientar que o desvio padrão σ_{Exp} apresentado acima foi calculado a partir dos dados térmicos experimentais nos instantes pré-aquecimento, onde espera-se que o fluxo imposto seja nulo e que, assim, a temperatura se mantenha, em média, constante (como pode ser visto na parte inicial da Fig. 7). Desta forma, as variações térmicas que ocorrem nesse período são exclusivamente flutuações experimentais, permitindo a obtenção correta do desvio padrão para o respectivo experimento.

As Figuras 9 e 10 apresentam, respectivamente, a comparação entre os perfis de temperatura para diferentes ordem de truncamento (inclusive o caso original não regularizado) e os resíduos obtidos pela diferença das temperaturas experimentais e estimadas.

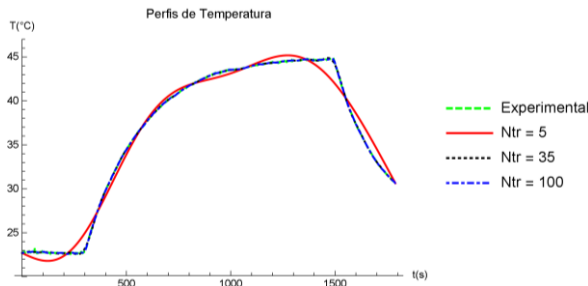


Figura 9. Perfis de temperatura experimentais regularizados

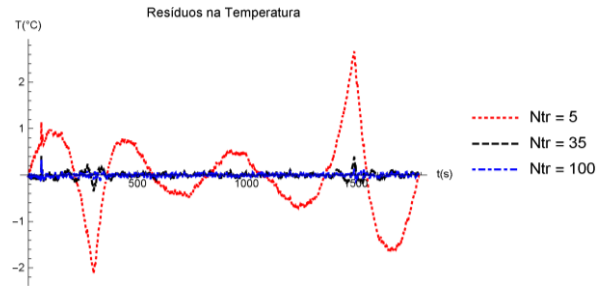


Figura 10. Resíduos entre as temperaturas reais e estimadas

Como o desvio padrão associado aos dados experimentais reais é muito baixo, devido à realização de um experimento preciso, as curvas apresentadas na Fig. 9 não possuem comportamentos muito distintos com relação à ordem de truncamento. A principal diferença é vista para o caso regularizado com 5 termos, já que é um número muito baixo para representar suficientemente o perfil de temperaturas. Com o aumento do número de termos, as curvas passam a sobrepor, o que é esperado.

O mesmo ocorre com o comportamento dos resíduos, como mostra a Fig. 10. A maior diferença está por conta do caso cuja ordem de truncamento é igual a 5, já que o mesmo possui o perfil mais distinto com relação aos dados não regularizados.

Apesar das mínimas diferenças apresentadas, a análise da variância pela Fig. 8 é ainda assim importante. Pelo que pode ser observado, a utilização de uma ordem de truncamento superior a aproximadamente 35 termos é desnecessária e prejudicial ao controle das oscilações da estimativa, enquanto ordens de truncamento inferiores pode não ser suficientes. Tais observações podem ser comprovadas pelos fluxos térmicos estimados, apresentados na Fig. 11 a seguir.

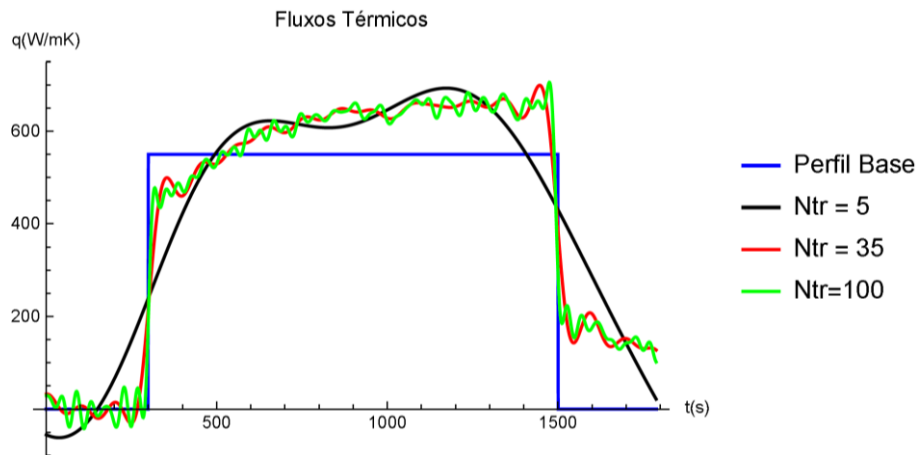


Figura 11. Comparação entre os fluxos estimados e o perfil base esperado

Comparadas ao o perfil base, as curvas estimadas possuem uma notável diferença, que aparentemente indica algum erro físico, matemático ou computacional da metodologia adotada. Porém, tal diferença é esperada e tem com uma das principais justificativas o efeito de inércia térmica da resistência utilizada para fornecimento do fluxo.

Ao ligarmos a fonte de corrente contínua, a resistência não fornece o fluxo máximo que se calcula instantaneamente. O mesmo ocorre quando a corrente é interrompida, levando um tempo para que o fluxo imposto cesse totalmente, o que provavelmente não ocorreu dentro do tempo avaliado no experimento, já que após $t=1500s$ o fluxo estimado ainda é não nulo. Além disso, o modelo prevê que a troca térmica em todos os contornos expostos ao ambiente ocorre sob as mesmas condições, já que o coeficiente de troca térmica h é considerado único.

Outro fator que influencia nessa diferença diz respeito aos experimentos e aos equipamentos utilizados. Tanto a resistência, quanto a fonte e os cabos que são utilizados possuem perdas e parâmetros cuja calibração precisa não é realizada ou são de difícil controle. De qualquer forma, o não conhecimento exato da fonte é esperado e até mesmo desejado, já que o intuito é justamente realizar essa estimativa e ampliar sua aplicação a casos que realmente não se conhece a priori o comportamento de fontes e fluxos térmicos.

Por fim, a Fig. 12 apresenta a comparação entre o fluxo estimado com 35 termos para o perfil regularizado, que, por todas as análises, apresenta o melhor resultado, e o fluxo estimado com os dados reais sem nenhuma regularização.

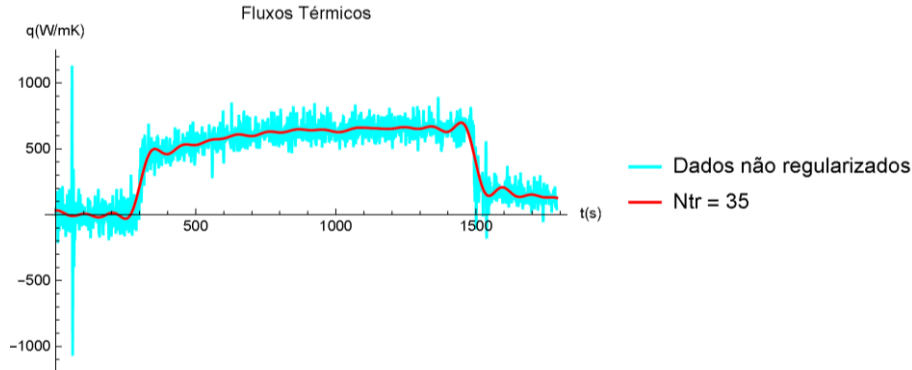


Figura 12. Fluxos estimados com e sem regularização dos dados experimentais

A aplicação direta dos dados térmicos experimentais sem nenhuma regularização amplifica os resíduos e oscilações presentes e impossibilita uma correta estimativa através da solução do problema inverso, mesmo para o caso estudado, em que os erros associados são muito pequenos.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam uma eficaz e promissora aplicação da abordagem explícita na solução inversa do modelo físico-matemático representado e para outros possíveis problemas relacionados. A etapa de validação com a utilização de dados sintéticos forneceu a base necessária para a aplicação experimental e obtenção de fluxos reais impostos no contorno da amostra analisada.

Juntamente à metodologia físico-matemática desenvolvida para os problemas direto e inverso, o processo de regularização se mostrou crucial para minimizar o comportamento mal-posto associado ao procedimento inverso e permitir, assim, boas estimativas para os casos avaliados, gerando resultados dentro do esperado.

Outros trabalhos já em andamento utilizam uma abordagem Bayesiana, através do Método de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC), e a regularização a partir da técnica Total Variation Denoising (TVD) nas informações a priori a fim de verificar por completo a equivalência das estimativas e validar a metodologia explícita. Além disso, são utilizadas outras variações para o fluxo imposto com relação ao tempo, como os perfis senoidal e triangular, tanto para dados sintéticos quanto para dados reais obtidos experimentalmente através da termografia por infravermelho.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro promovido pelas agências FAPERJ, CNPq e CAPES.

7. REFERÊNCIAS

- Agnelli, J. P., Barrea, A. A. e Turner, C. V., 2011, "Tumor location and parameter estimation by thermography", Mathematical and Computer Modeling, Vol. 53, No. 7, pp. 1527-1534.
- Aguirre, H. R. B., 1997, "Reconstrução de soluções não-suaves dos problemas mal postos em inversão geofísica", Dissertação de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, UFRJ.
- Campos Velho, H. F., 2001, "Problemas Inversos: Conceitos Básicos e Aplicações", IV Encontro de Modelagem Computacional – Instituto Politécnico do Rio de Janeiro, Nova Friburgo.
- Chen, T. C. e Hsu, S. J., 2007, "Input estimation method in the use of electronic device temperature prediction and heat flux inverse estimation", Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, Vol. 52, No. 9, pp. 795-815.
- Eberhart, R. C. e Shitzer, A., 2012, "Heat Transfer in Medicine and Biology: analysis and applications", Springer Science & Business Media, Vol. 2.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L. e Lavine, A. S., 2014, "Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa", 7ª ed.
- Knupp, D. C. e Abreu, L. A. S., 2016, "Explicit boundary heat flux reconstruction employing temperature measurements regularized via truncated eigenfunction expansions", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 78, pp. 241-252.

- Marinetti, S., Bison, P. G. e Grinzato, E., 2002, “3D heat flux effects in the experimental evaluation of corrosion by IR thermography”, Quantitative InfraRed Thermography, Vol. 6.
- Muniz, W. B., 1999, “Um problema inverso em condução do calor utilizando métodos de regularização”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada, UFRGS.
- Renault, N., André, S., Mailliet, D. e Cunat, C., 2008, “A two-step regularized inverse solution for 2-D heat source reconstruction”, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 47, No. 7, pp. 834-847.
- Renault, N., André, S., Mailliet, D. e Cunat, C., 2010, “A spectral method for the estimation of a thermomechanical heat source from infrared temperature measurements”, International Journal of Thermal Science, Vol 49, No. 8, pp. 1394-1406.
- Silva, R. N. T., 2007, “Estudo da Termografia por infravermelho: aplicações na engenharia e determinação de parâmetros termofísicos e geométricos de materiais”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPE.
- Yang, L., Wang, Y., Liu, H., Yan, G., e Kou, W., 2014, “Infrared identification of internal overheating components inside an electric control cabinet by inverse heat transfer problem”, International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014: Infrared Technology and Applications, International Society for Optics and Photonics, Vol. 9300, pp. 930002.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ESTIMATION OF TRANSIENT THERMAL FLOW THROUGH THE USE OF INFRARED THERMOGRAPHY, INVERSE PROBLEMS AND REGULARIZATION TECHNIQUES

Emerson de Lima Sanches, emerson_llpsanches@hotmail.com¹

Luiz Alberto da Silva Abreu, abreu.l@gmail.com¹

Diego Campos Knupp, diegoknupp@gmail.com¹

Antônio José da Silva Neto, ajs_neto@uol.com.br¹

Fabricio da Silva Mascouto, fabricio_mascouto@hotmail.com¹

¹Rio de Janeiro State University, Polytechnic Institute (IPRJ/UERJ) – 25 Bonfim St., Vila Amélia, Nova Friburgo, RJ

Abstract. *The main objective of this article is to estimate transient thermal fluxes applied to one of the contours of a thermally thin sample by solving the associated direct and inverse problems and by incorporating real thermal data obtained experimentally through infrared thermography. The adopted model is equivalent to a transient heat conduction problem without spatial variation, which allows the application of an explicit methodology of solution of the inverse problem. In addition, due to the misplaced nature of the inverse problems, an analysis of the influence of the regularization of the experimental data on the obtained results is carried out.*

Keywords: Heat Transfer, Inverse Problems, Infrared Thermography, Regularization Techniques.