

## **USO DO MÉTODO DA FUNÇÃO ESPECIFICADA E CFX PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS INVERSOS**

Carlos Adriano Correa Ribeiro<sup>1</sup>, [cadrianocr@yahoo.com.br](mailto:cadrianocr@yahoo.com.br)  
Luís Felipe dos Santos Carollo<sup>1</sup>, [felipecarollo@unifei.edu.br](mailto:felipecarollo@unifei.edu.br)  
João Roberto Ferreira<sup>1</sup>, [jorofe@unifei.edu.br](mailto:jorofe@unifei.edu.br)  
Rogério Fernandes Brito<sup>2</sup>, [rogbrito@unifei.edu.br](mailto:rogbrito@unifei.edu.br)  
Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva<sup>1</sup>, [metrevel@unifei.edu.br](mailto:metrevel@unifei.edu.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Campus José Rodrigues Seabra, Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Laboratório de Transmferencia de Calor – LabTC, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, CEP 37500 – 903, Caixa Postal 50, Itajubá, MG, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Campus Avançado de Itabira, Rua São Paulo, 377 - ITEC, Bairro Amazonas, CEP 35900 – 373, Itabira, MG, Brasil

**Resumo:** *O presente trabalho visa apresentar uma metodologia para resolver problemas inversos de transferência de calor em regime transiente. Assim, a técnica Função Especificada é empregada com o software comercial CFX. Neste trabalho são apresentados estudos de transferência de calor por condução uni e tridimensionais usando técnicas de problemas inversos. Neste sentido foram feitos experimentos controlados em laboratório onde amostras metálicas foram submetidas a um fluxo de calor numa superfície, sendo as demais isoladas. Termopares foram inseridos em regiões de acesso a fim de se obter dados sobre a variação de temperatura para aplicação do problema inverso. Estas regiões de acesso podem ser a superfície oposta ao aquecimento para o problema térmico unidimensional ou em pontos próximos ao aquecimento para um modelo tridimensional. O passo seguinte é estimar o fluxo aplicado na amostra. Nesta etapa, o software comercial CFX é empregado em conjunto à técnica Função Especificada para obter as temperaturas nos pontos equivalentes aos monitorados no experimento. O fluxo de calor estimado é comparado ao fluxo de calor experimental nos dois casos estudados neste trabalho apresentando resultados satisfatórios. A vantagem de se empregar o software comercial é a flexibilidade proporcionada em aceitar diferentes geometrias, bem como, diversas condições de contorno.*

**Palavras-chave:** *problemas inversos, função especificada, condução de calor, gradiente de temperatura, CFX.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Processos sujeitos a transferência de calor por condução são comuns em diversos problemas da engenharia, na indústria, e na própria natureza. O conhecimento das taxas de transferência de calor e dos campos de temperatura é essencial para entender, controlar e aperfeiçoar tais processos, sejam eles metalúrgicos, químicos ou de qualquer natureza. Analisar transferência de calor é uma tarefa onerosa e na maioria das vezes difícil de ser modelada, e quando se consegue fazer essa modelagem, não é possível obter uma solução simplificada para o problema. Há inúmeras técnicas para estudar a transferência de calor, contudo, diversas limitações levaram a desenvolver uma nova classe, que são os chamados problemas inversos.

Um problema inverso é aquele em que há a necessidade de conhecer o comportamento de uma dada grandeza, mas por algum empecilho, não é possível mensurá-la diretamente. Assim, uma alternativa é medir outra grandeza e a partir desta, estimar o valor da variável de interesse. Como exemplos para este tipo de aplicação, pode-se mencionar a estimativa do fluxo de calor gerado numa ferramenta de corte durante um processo de usinagem, a temperatura da chama dentro de uma câmara de combustão, o fluxo de calor gerado em um processo de soldagem, entre outras aplicações.

Problemas inversos têm desvantagens em relação aos problemas diretos do ponto de vista matemático por serem mais difíceis de serem resolvidos, contudo não exigem conhecimento prévio das condições de contorno. Dessa maneira, torna-se conveniente usar essas técnicas para estudar transferência de calor em sólidos de geometria complexa. Os problemas inversos envolvem métodos de otimização, com âmbito de minimizar o erro entre o valor estimado e o valor real da variável de interesse. Estes são ainda, sensíveis a erros da medição dos dados, ou seja, ruídos no sinal de entrada podem afetar a estimativa da variável de interesse. Embora não dependa das condições de contorno, a resolução de

problemas inversos está ligada à geometria do sólido em questão, o que levou alguns pesquisadores a buscarem união entre as técnicas de problemas inversos e softwares comerciais, como o CFX. A vantagem desta união é a versatilidade do software comercial em aceitar qualquer geometria, bem como qualquer condição de contorno, o que possibilita grandes avanços em estudos de problemas inversos de condução de calor. Huang e Chen (1999) realizaram um estudo do fluxo de calor por convecção forçada em um sistema tridimensional, empregando o software comercial CFX 4.2, aliado a técnica de problema inverso. Huang *et al.* (2005) usaram técnicas de problemas inversos ao analisar a distribuição tridimensional de temperaturas em ferramentas de corte. Neste trabalho, a técnica inversa junto a técnica máxima descida foi usada para minimizar o erro entre o fluxo de calor estimado e o experimental. Junto à técnica inversa, foi empregado o software CFX 4.4 para resolver a equação da difusão do calor. Huang *et al.* (2007) aplicaram uma técnica de problema inverso para estimar o fluxo de calor no processo de furação de ligas de titânio. Neste estudo, o software comercial CFX 4.4 foi empregado junto ao algoritmo inverso para estimar o fluxo de calor resultante na broca durante esta operação.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia integrando técnicas de problemas inversos com o software comercial CFX. Deste modo, a técnica inversa método da Função Especificada é usada junto com o CFX para estimar o fluxo de calor aplicado na superfície da amostra. A validação desta metodologia é feita em dois experimentos distintos realizados em laboratório. No primeiro experimento, a superfície superior de uma amostra metálica de aço inox AISI 316 foi aquecida uniformemente e as demais superfícies são isoladas, garantindo a condição unidimensional. No segundo experimento, uma amostra de aço inox AISI 304 foi aquecida somente em parte de sua superfície superior e todas as outras superfícies foram isoladas, caracterizando a condição de experimento tridimensional.

Pretende-se na seqüência deste trabalho, aplicar esta metodologia em ferramentas de corte de processos de usinagem por torneamento. O campo de análise térmica de ferramentas para usinagem tem chamado a atenção de inúmeros pesquisadores como Tay *et al.* (1976), Stephenson (1991), Stephenson (1996), Jen *et al.* (2001), Battaglia *et al.* (2005) e Carvalho *et al.* (2006). Nestes tipos de processo ocorrem elevadas temperaturas que prejudicam o desempenho da ferramenta e reduzem sua vida útil. Ao conhecer corretamente como são os gradientes de temperatura numa ferramenta de corte em tempo real, é possível desenvolver métodos mais eficientes para refrigeração desta, permitindo-a uma maior vida útil, além de outras melhorias no processo de usinagem.

## 2. ASPECTOS TEÓRICOS

### 2.1. Modelo Térmico Unidimensional

Apresenta-se na Fig. 1a, o esquema do problema térmico para o modelo unidimensional. Uma amostra homogênea de aço inox AISI 316, inicialmente a temperatura  $T_0$  é sujeita a um fluxo de calor uniforme e constante,  $q_0''$ , na superfície superior, a partir do tempo  $t = 0$  e é isolada nas demais superfícies. Observa-se na Fig. 1a que o modelo térmico é apresentado em uma montagem simétrica. A montagem simétrica é usada para diminuir os erros na medição do valor do fluxo de calor aplicado. Na Figura 1b é apresentada uma vista mais detalhada do modelo unidimensional. Nesta figura, as grandezas  $a$ ,  $b$  e  $L$  são respectivamente o comprimento, a largura e a espessura da amostra de aço AISI 316.

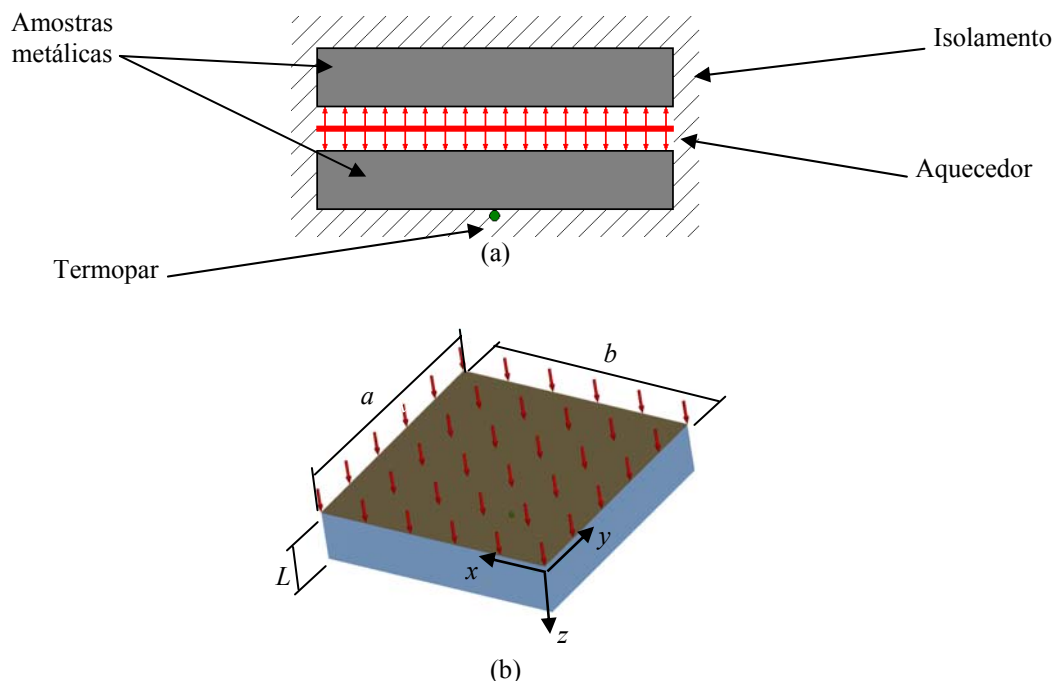


Figura 1. (a) Modelo térmico unidimensional. (b) Detalhes da amostra de aço AISI 316.

A equação da difusão do calor, em coordenadas cartesianas, para o problema apresentado na Fig. 1, é dada por:

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

sujeita as seguintes condições de contorno:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z}(z,t) = q_0'' \text{ em } z = 0 \quad (2)$$

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

e à condição inicial:

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

sendo  $T_0$  a temperatura inicial,  $t$  o tempo,  $\alpha$  a difusividade térmica da amostra,  $\lambda$  a condutividade térmica da amostra e  $z$  a direção de propagação do calor.

## 2.2. Modelo Térmico Tridimensional

A Figura 2 mostra o esquema para o modelo térmico tridimensional. Para este modelo utiliza-se uma amostra homogênea de aço inox AISI 304 sujeita à temperatura inicial  $T_0$  e a um fluxo de calor uniforme e constante,  $q_0''$ . Neste caso, o fluxo de calor é aplicado somente em parte de sua superfície superior, a partir do tempo  $t = 0$ . Todas as outras superfícies não sujeitas ao fluxo de calor são isoladas. Assim, como no modelo unidimensional, é adotada uma montagem simétrica.

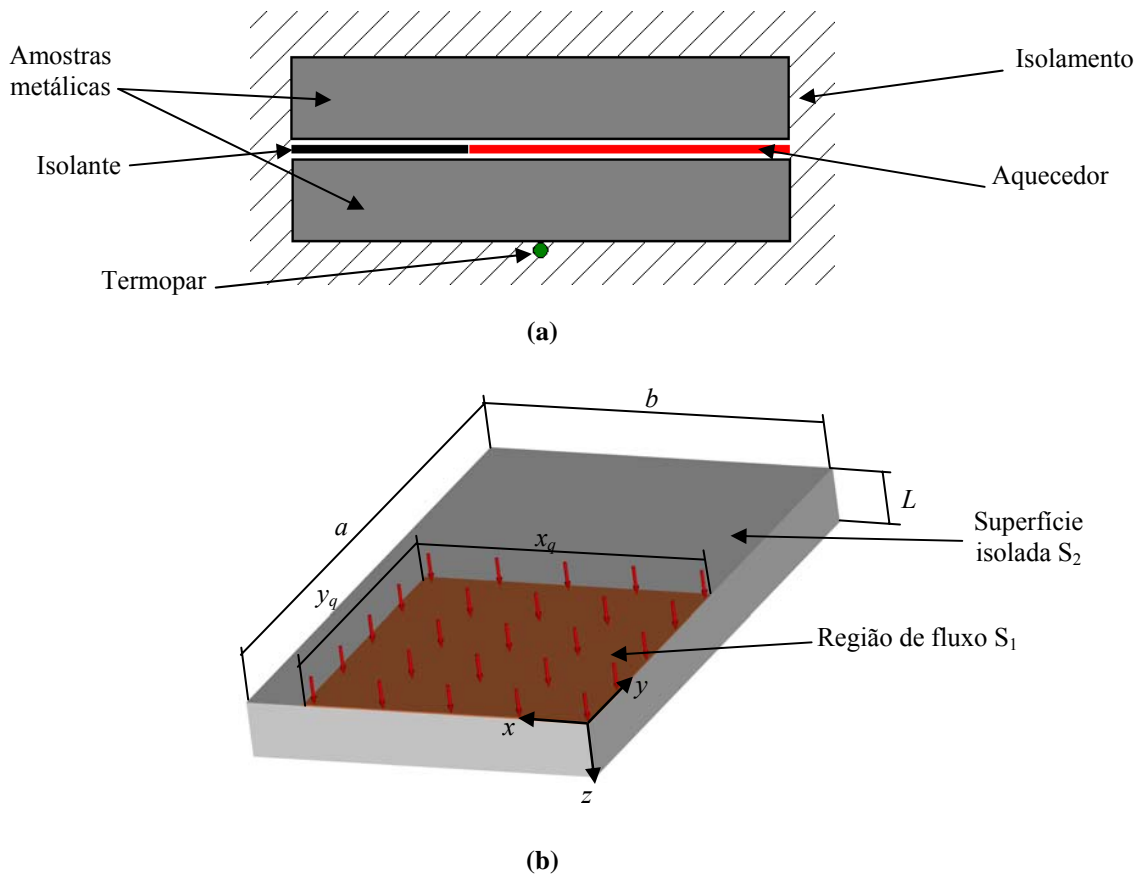


Figura 2. (a) Modelo térmico tridimensional. (b) Detalhes da amostra de aço AISI 304.

Da mesma forma que no caso anterior  $a$  e  $b$  são respectivamente o comprimento e a largura da amostra,  $x_q$  e  $y_q$  são as dimensões da superfície de aquecimento  $S_1$  e  $S_2$  são as demais superfícies isoladas.

A equação da difusão de calor, em coordenadas cartesianas, está representada pela Eq. (5):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, y, z, t) + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}(x, y, z, t) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}(x, y, z, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, z, t) \quad (5)$$

sujeita às condições de contorno:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z}(x, y, z, t) = q_0'' \text{ em } z = 0 \text{ em } S_1, (0 \leq x \leq x_q, 0 \leq y \leq y_q) \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(x, y, z, t) = 0 \text{ em } S_2 \quad (7)$$

e a condição inicial:

$$T(x, y, z, t) = T_0 \text{ em } t = 0 \quad (8)$$

sendo  $T_0$  a temperatura inicial,  $t$  o tempo,  $\alpha$  a difusividade térmica,  $\lambda$  a condutividade térmica do material da amostra e  $x$ ,  $y$  e  $z$  as direções de propagação do calor.

### 2.3. Software CFX 12

Concebido os modelos a serem estudados, o passo seguinte é modelá-los usando o software CFX. O software permite a modelagem da geometria bem como a configuração das condições de contorno e inicial. Fornecidas tais informações, o software resolve a equação da difusão de calor para o caso uni e tridimensional, empregando o método de volumes finitos. Desta forma, o software CFX fornece o campo de temperatura nas amostras.

### 2.4. Função Especificada

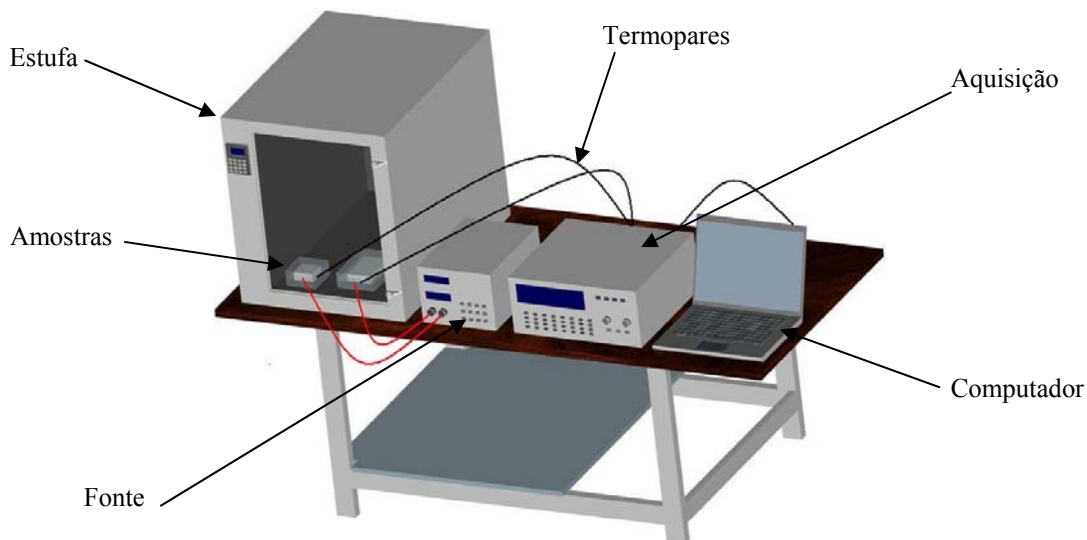
No método Função Especificada Seqüencial, as componentes do fluxo de calor são utilizadas no algoritmo de estimação. Uma vantagem desse método é o fato de se analisar previamente a evolução das temperaturas experimentais e calculadas conforme o número de tempos futuros adotados, para enfim calcular o parâmetro estimado, ou seja, o fluxo de calor. Esta metodologia contribui para uma diminuição da propagação dos ruídos experimentais no fluxo de calor calculado. Outras vantagens são sua fácil implementação computacional e baixo tempo de processamento computacional quando comparado a outras técnicas. Como desvantagem cita-se a escolha adequada do funcional (constante, parabólico, exponencial ou cúbico) e do número de tempos futuros para a estimativa da componente de fluxo de calor no tempo. O método consiste em atribuir uma forma funcional temporária para o fluxo de calor superficial transiente para instantes de tempo superiores ao atual de estimativa. Nesse caso, as formas do fluxo podem ser constantes, parabólicas, exponenciais ou cúbicas. O procedimento mais simples da Função Especificada Seqüencial é o qual utiliza uma seqüência de segmentos de retas constantes como forma funcional para descrever o comportamento do fluxo de calor superficial para tempos futuros. Desta maneira, considera-se temporariamente que várias componentes de fluxo de calor futuros são constantes com o tempo. O fluxo de calor especificado para  $r$  tempos futuros representa o modelo do fluxo que será estimado, ou seja, as componentes do fluxo de calor ( $q_1, q_2, \dots, q_{M-1}$ ) são consideradas previamente estimadas e são denotadas por:  $\hat{q}_1, \hat{q}_2, \dots, \hat{q}_{M+r-1}$ . Para aumentar a estabilidade do algoritmo inverso, as componentes de fluxo de calor  $q_{M+1}, q_{M+2}, \dots, q_{M+r-1}$  são assumidas iguais, ou seja,  $q_{M+1} = q_{M+2} = \dots = q_{M+r-1}$  (Beck *et al.*, 1985). No algoritmo seqüencial de estimativa de  $q_M$ , as temperaturas  $T_{M+1}, T_{M+2}, \dots, T_{M+r-1}$  são necessárias e calculadas com a hipótese de fluxo de calor constante. Assim, a estimativa de  $q_M$  é obtida através da minimização da diferença quadrática  $S$  entre as temperaturas experimentais ( $Y_{M+1}, Y_{M+2}, \dots, Y_{M+r-1}$ ) e calculadas ( $T_{M+1}, T_{M+2}, \dots, T_{M+r-1}$ ), ou seja:

$$S = \sum_{i=1}^r (Y_{M+i-1} - T_{M+i-1})^2 \quad (9)$$

sendo  $Y$  as temperaturas experimentais,  $T$  as temperaturas calculadas,  $M$  é o índice geral do tempo,  $r$  o número de tempos futuros e  $i$  o contador de tempos futuros.

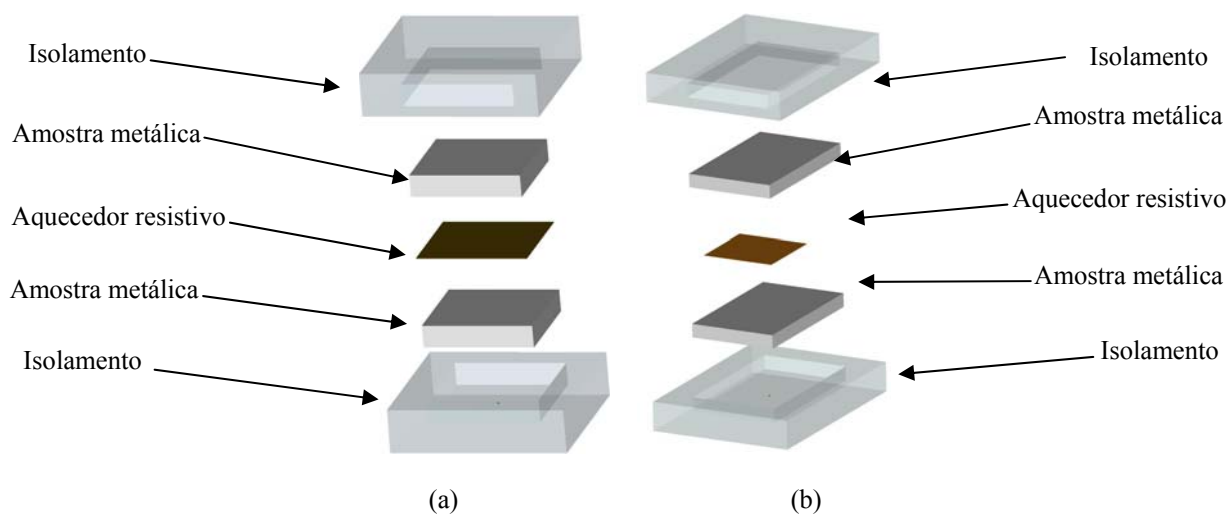
### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados em uma bancada tal como a representada pela Fig. 3. Esta é constituída por uma aquisição de dados controlada por um microcomputador, uma fonte de alimentação MCE 1051, responsável por fornecer o fluxo de calor, e uma estufa.



**Figura 3. Esquema da bancada experimental empregada nos ensaios.**

Os experimentos foram desenvolvidos de maneira semelhante. O aquecedor resistivo é feito de kapton com dimensões 50,0 x 50,0 x 0,2 mm. Este aquecedor possui 15  $\Omega$  de resistência e está conectado à fonte de alimentação para fornecer o fluxo de calor desejado. O aquecedor é colocado entre duas amostras de aço AISI 316 ou de aço AISI 304, caracterizando uma montagem simétrica. Esta montagem é desejada, pois minimiza os erros na medição do fluxo de calor aplicado. Para evitar os interstícios de ar e a resistência de contato entre os componentes da montagem aplicou-se pasta térmica de prata Arctic Silver 5. A condição de isolamento das superfícies não sujeitas a fluxo de calor é feita com placas de isopor. Além de caracterizar a condição de isolamento e garantir o fluxo de calor unidimensional, as placas de isopor evitam a influência da convecção. Os dados de temperatura são adquiridos através do termopar tipo K (30AWG), soldado por descarga capacitiva na superfície oposta ao fluxo calor. O termopar, por sua vez, é conectado a uma aquisição de dados Agilent 34980, controlada por um micro computador. Para a calibração do termopar foi usado um banho calibrador de temperatura Marconi MA 184 cuja resolução é  $\pm 0,01$  °C. Buscando obter melhores resultados, todos os experimentos foram realizados em laboratório com temperatura controlada, além da montagem ter sido realizada dentro de uma estufa. As Figuras 4a e 4b exibem respectivamente uma vista expandida da montagem para o experimento uni e tridimensional. Nestas figuras vê-se como se posicionam o isolamento, as amostras metálicas e os aquecedores resistivos para cada caso.



**Figura 4. Vista em detalhes da montagem das amostras.**

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

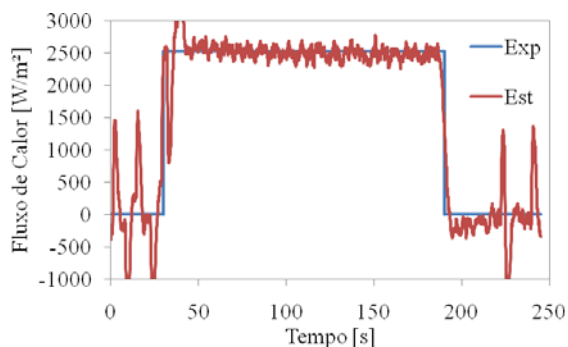
### 4.1. Experimento Unidimensional para o Aço Inox AISI 316

Para este caso foram realizados 30 experimentos. A amostra de aço inox AISI 316 possui as dimensões de 50,0 x 50,0 x 10,1 mm. Os experimentos tiveram a duração total de 250 s, sendo fluxo nulo nos primeiros 30 s, seguidos de 160 s com fluxo de 2538 W/m<sup>2</sup> e novamente fluxo nulo nos 60 s finais. Os intervalos de tempo entre as leituras de temperatura para este caso foi de 0,1 s, totalizando 2.500 pontos de temperatura. As propriedades termofísicas adotadas foram determinadas experimentalmente. A Tabela 1 apresenta os valores das propriedades térmicas usadas para o aço inox AISI 316. O valor da condutividade térmica foi obtido experimentalmente por Carollo *et al.* (2010) em trabalho submetido ao CONEM 2010. A massa específica e o calor específico foram retirados de Incropera *et al.* (2007).

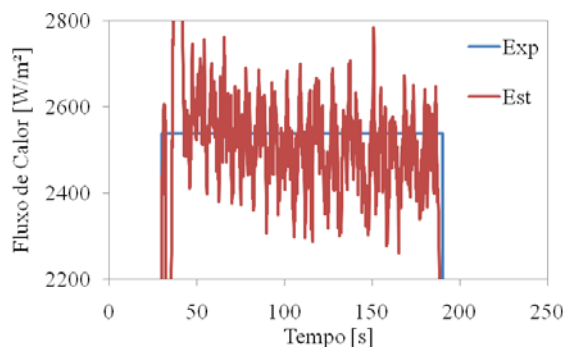
**Tabela 1. Propriedades termofísicas adotadas para a amostra de aço inox AISI 316.**

Propriedades	Valor	Unidade
Condutividade térmica	13,48	W / mK
Massa específica	8.238	kg / m <sup>3</sup>
Calor específico	468	J / kgK

Na Figura 5 apresenta-se uma comparação entre os fluxos de calor experimental e estimado para um dos casos. O fluxo foi estimado para  $r$  igual a 50 tempos futuros. A Figura 6 demonstra com mais detalhes os fluxos, experimental e estimado, na região de fluxo constante.

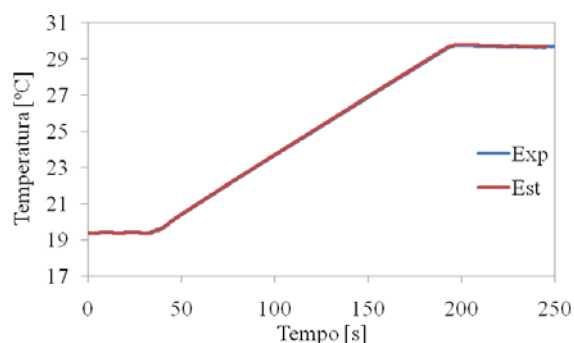


**Figura 5. Comparação entre os fluxos experimental e estimado para  $r = 50$ .**

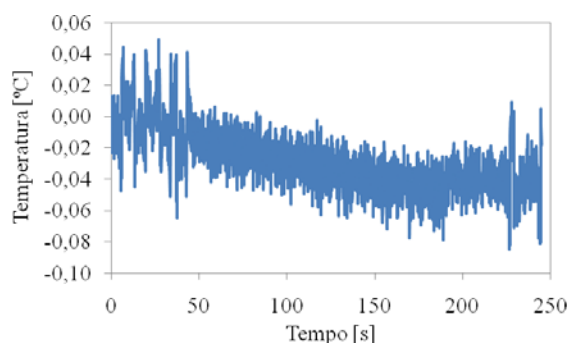


**Figura 6. Vista ampliada dos fluxos de calor.**

Analisando a Figura 5, percebe-se que o fluxo estimado, embora apresente esporadicamente valores discrepantes do experimental, apresenta comportamento semelhante ao experimental. Este fato pode ser comprovado pela Fig. 6 em que nota-se a oscilação do fluxo estimado em valores bem próximos ao experimental. A Figura 7 apresenta a temperatura experimental com a calculada pelo fluxo estimado. A Figura 8 demonstra resíduos entre estas duas temperaturas.



**Figura 7. Comparação entre as temperaturas experimental e calculada pelo fluxo estimado.**



**Figura 8. Resíduo percentual entre as temperaturas experimental e calculada.**

Como esperado, a temperatura calculada pelo fluxo estimado aproximou-se muito bem da temperatura experimental, visto que está é uma característica da técnica Função Especificada. Este fato pode ser comprovado pelo pequeno desvio apresentado entre o fluxo estimado quando comparado com o experimental. Os mesmos resultados foram encontrados para os outros 29 experimentos realizados.

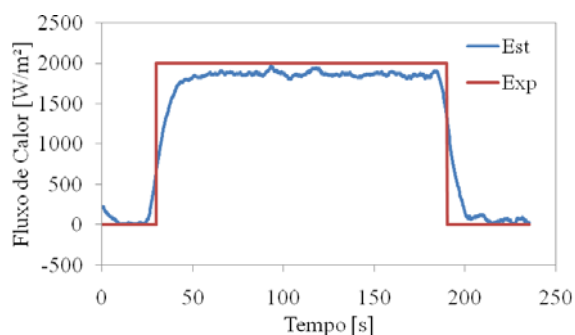
#### 4.2. Experimento Tridimensional para o Aço Inox AISI 304

Realizou-se 10 experimentos para este caso. A amostra de aço inox AISI 304 possui as dimensões de 100,0 x 60,0 x 9,5 mm. Assim como feito nos experimentos unidimensionais, os tridimensionais tiveram a duração total de 250 s, sendo fluxo nulo nos primeiros 30 s, seguidos de 160 s com fluxo de 2.000 W/m<sup>2</sup>, e os últimos 60 segundos com fluxo nulo. O intervalo de tempo entre as tomadas de temperatura foram de 0,2 s, perfazendo 1250 pontos de temperatura. As propriedades termofísicas consideradas neste caso são dadas pela Tab. 2, e tem como referência Incropera *et al.* (2007).

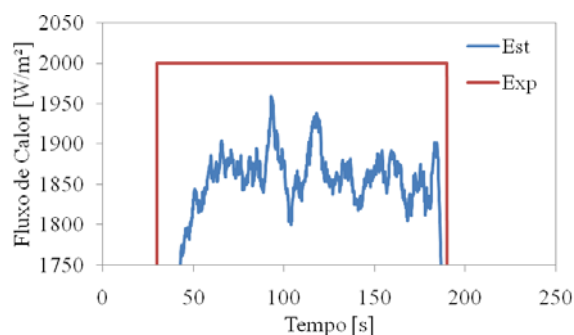
**Tabela 2. Propriedades termofísicas adotadas para a amostra de aço inox AISI 304.**

Propriedades	Valor	Unidade
Condutividade térmica	14,90	W / mK
Massa específica	7.900	kg / m <sup>3</sup>
Calor específico	477	J / kgK

As Figuras 9 e 10 mostram respectivamente uma comparação entre fluxos e o detalhamento da região de fluxo constante. Similar ao caso unidimensional, a diferença encontrada entre os fluxos é cerca de 150 W/m<sup>2</sup>, aproximadamente 6,3 %, confirmando a confiabilidade do método.

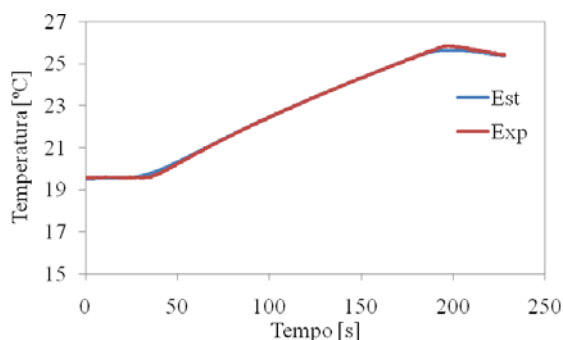


**Figura 9. Comparação entre os fluxos experimental e estimado para  $r = 50$ .**

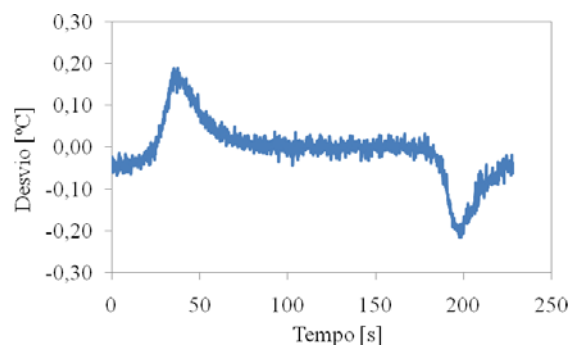


**Figura 10. Vista ampliada dos fluxos de calor.**

As Figuras 11 e 12 apresentam a comparação entre as temperaturas experimental e calculada pelo fluxo estimado e o desvio percentual entre elas.



**Figura 11. Comparação entre as temperaturas experimental e calculada pelo fluxo estimado.**



**Figura 12. Resíduo percentual entre as temperaturas experimental e calculada.**

Analisando a Fig. 12 observa-se que os resíduos foram menores que 1 %. Os mesmos resultados foram encontrados para os demais experimentos. Assim, mais uma vez fica demonstrada a boa concordância da metodologia aqui proposta. A Figura 13 apresenta o campo térmico tridimensional para o caso analisado acima.

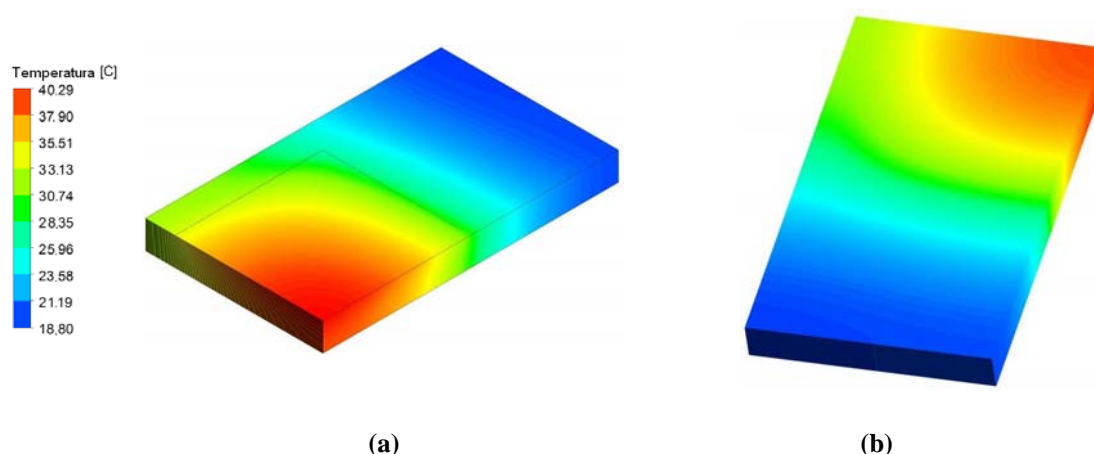


Figura 13. Campo térmico para o experimento tridimensional na superfície superior (a) e inferior (b).

## 5. CONCLUSÕES

Foi proposto neste trabalho, o uso combinado do software comercial CFX e da técnica da função especificada, para resolver problemas inversos de condução de calor. Foram feitos ensaios de condução de calor em regime transiente em modelos uni e tridimensionais usando respectivamente amostras de aço AISI 316 e 304. A aplicação da técnica Função Especificada aliada ao uso de software comercial CFX 12 mostrou bons resultados. Assim, objetiva-se utilizar o CFX 12 em conjunto a técnicas de otimização como BFGS, Seção Áurea, entre outras, apresentando uma comparação entre os resultados de fluxo de calor e temperatura estimados. Além disso, uma vez validada a metodologia proposta por este trabalho, pretende-se aplicá-la a processos de usinagem por torneamento, pois este é um processo que envolve elevados gradientes de temperatura à ferramenta de corte afetando diretamente a sua vida útil.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, FAPEMIG e CAPES pelo suporte financeiro. O aluno Carlos Adriano Corrêa Ribeiro agradece ao CNPq pela bolsa de mestrado.

## 7. REFERÊNCIAS

- Battaglia, J. L., Puigsegur, L., Cahuc, O., 2005, "Estimated Temperature on a Machined Surface Using an Inverse Approach", *Experimental Heat Transfer*, Vol. 18, pp.13 – 25.
- Beck, J. V., Blackwell, B. and St Clair, C., 1985, "*Inverse Heat Conduction: Ill-posed Problems*", Wiley – Interscience Publication, New York, 308p.
- Carollo, L. F. S., Lima, G. M., Lima e Silva, A. L. F., Lima e Silva, S. M. M., 2010, "*Estimativa Simultânea da Capacidade de Calor Volumétrica e da Condutividade Térmica de Materiais Metálicos*", Submetido ao VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM2010, Campina Grande, Paraíba, Brasil.
- Carvalho, S. R., Lima e Silva, S. M. M., Machado, A. R., Guimarães G., 2006, "Temperature Determination at the Chip-tool Interface using an Inverse Thermal Model considering the Tool and Tool Holder", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 179, pp. 97 – 104.
- Huang, C. H., Chen, W. C., 1999, "A Three-Dimensional Inverse Forced Convection Problem in Estimating Surface Heat Flux by Conjugate Gradient Method", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3171 – 3181.
- Huang, C. H., Lo, H., 2005, "A Three-Dimensional Inverse Problem in Predicting the Heat Flux Distribution in the Cutting Tools", *Numerical Heat Transfer*, Vol. 48, pp. 1009 – 1034.
- Huang, C. H., Jan, C. J., Li, R., Shih A. J., 2007, "A Three-Dimensional Inverse Problem in Estimating The Applied Heat Flux of a Titanium Drilling – Theoretical and Experimental Studies", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 3265 – 3277.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., 2007, "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*", John Wiley & Sons, 6<sup>th</sup> ed. USA, 997p.
- Jen, T. C., Gutierrez, G., Eapen, S., 2001, Numerical Analysis in Interrupted Cutting Tool Temperatures", *Numerical Heat Transfer*, Vol. 39, pp. 1 – 20.
- Stephenson, D. A., 1991, "Assessment of Steady-State Metal Cutting Temperature Models Based on Simultaneous Infrared and Thermocouple Data", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, pp. 121 – 128.
- Stephenson, D. A., 1996, "Cutting Temperature of Ceramic Tools in High Speed Machining of Difficult-to-Cut Materials", *International Journal of Machining Tools Manufacturing*, Vol. 36, pp. 611 – 634.



Tay, A. O., Stevenson, M. G., Davist, G. V., Oxley, P. L. B., 1976, "A Numerical Method for Calculating Temperature Distributions in Machining From Force and Shear Angle Measurements", *International Journal Machining Tool Design*, Vol. 16, pp. 335 – 349.

## **8. DIREITOS AUTORAIS**

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.



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*

## **USE OF SPECIFIED FUNCTION METHOD AND CFX FOR INVERSE PROBLEMS SOLUTION**

Carlos Adriano Correa Ribeiro<sup>1</sup>, [cadrianocr@yahoo.com.br](mailto:cadrianocr@yahoo.com.br)  
Luís Felipe dos Santos Carollo<sup>1</sup>, [felipecarollo@unifei.edu.br](mailto:felipecarollo@unifei.edu.br)  
João Roberto Ferreira<sup>1</sup>, [jorofe@unifei.edu.br](mailto:jorofe@unifei.edu.br)  
Rogério Fernandes Brito<sup>2</sup>, [rogbrito@unifei.edu.br](mailto:rogbrito@unifei.edu.br)  
Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva<sup>1</sup>, [metrevel@unifei.edu.br](mailto:metrevel@unifei.edu.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Campus José Rodrigues Seabra, Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Laboratório de Transferência de Calor – LabTC, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, CEP 37500 – 903, Caixa Postal 50, Itajubá, MG, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Campus Avançado de Itabira, Rua São Paulo, 377 - ITEC, Bairro Amazonas, CEP 35900 – 373, Itabira, MG, Brasil

***Abstract.** This paper presents a methodology to solve inverse problems of transient heat transfer. The Specified Function technique is used in set with the commercial software CFX. Studies of heat conduction for one and three-dimensional models are performed using techniques of inverse problems. Then, experiments were carried out in laboratory in which metal samples are subjected to a heat flux on the top surface while others were isolated. Thermocouples were welded on isolated surface in order to obtain temperature data for application of the inverse problem. The next step is to estimate the applied heat flux on the sample. In this stage, the commercial software CFX is used together with the Specified Function technique to obtain the temperatures at equivalent locations of those monitored in the experiment. The estimated heat flux is compared to the experimental heat flux presenting small deviations. The commercial software CFX was used because it has many advantages as the flexibility offered to accept different geometries, various boundary conditions, between others.*

**Keywords:** *inverse problems, specified function, heat conduction, temperature gradient, CFX.*