



8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA

Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007

METODOLOGIA PARA A ESTIMATIVA DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA PELO MÉTODO DO FLASH LASER

Pablo Andrade Grossi¹, Denise das Mercês Camarano², Ricardo Alberto Neto Ferreira³, Roberto Márcio de Andrade⁴

^{1,2,3}CDTN/CNEN Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/ Comissão Nacional de Energia Nuclear, Cidade Universitária, Pampulha, CEP 30 123-970 - Belo Horizonte, Minas Gerais

⁴Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Pampulha, CEP 31 270-901 - Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

e-mail: ¹pabloag@cdtn.br, ²dmc@cdtn.br, ³ranf@cdtn.br, ⁴rma@ufmg.br

RESUMO

O método de Flash do Laser é o método mais popular para medição das propriedades termofísicas de sólidos. Apesar de inúmeras vantagens, alguns obstáculos experimentais vem sendo encontrados devido à dificuldade de fornecer as condições ideais e de contorno exigidas por este método. Neste trabalho é apresentada uma metodologia para a estimativa da incerteza de medição da difusividade térmica do Ferro e Pyroceram 9606, à temperatura de 20 °C, utilizando a técnica de volumes finitos com objetivo de estimar a influência dos componentes de incerteza devido a: tempo de pulso; potência do laser; trocas térmicas; absortividade, espessura e densidade do material. Simulações também foram feitas para a estimativa da condutividade térmica e do calor específico. Os resultados indicam que na maioria dos casos o tempo de pulso é o principal componente de incerteza, seguido da potência do laser e da absortividade do material. Esses resultados indicam quais as grandezas de entrada necessitam ser conhecidas com maior exatidão e menor incerteza de medição, mostrando a versatilidade desta técnica em comparação com os modelos comumente empregados, pois reduz o nível de restrições com relação ao modelo original proposto.

PALAVRAS CHAVE: Método de Flash do Laser, difusão térmica, incerteza de medição, volumes finitos.

INTRODUÇÃO

O crescente aparecimento de novos materiais (metálicos, cerâmicos, compósitos, biomateriais etc.), gerou um aumento na demanda pela determinação com maior exatidão e menor incerteza de medição das suas propriedades termofísicas (difusividade térmica, condutividade térmica e calor específico) em função da temperatura [1]. Existem vários métodos para a medição de propriedades termofísicas os quais podem ser divididos em duas classes: os métodos que utilizam o fluxo de calor em regime permanente (métodos de Angstrom e suas modificações, termoeétrico e o de onda radial); e os métodos que utilizam o fluxo de calor em regime transiente (métodos da barra, da placa semi-finita, do fluxo de calor radial, da alta intensidade de arco, da haste aquecida eletricamente e o método do Flash de Laser) [2]. Entretanto, alguns inconvenientes, como longo tempo requerido na realização das medições, necessidade de amostras de grandes dimensões, elevado percentual de erro de medição, vem impondo limitações na aplicação da maioria destes métodos.

No método Flash de Laser [3], um flash de energia radiante, intenso e curto, é aplicado uniformemente sobre a face de uma pequena amostra. O pulso de energia difunde unidirecionalmente para a face oposta, obtendo-se um registro do transiente de elevação de temperatura nesta face (Fig. 1).

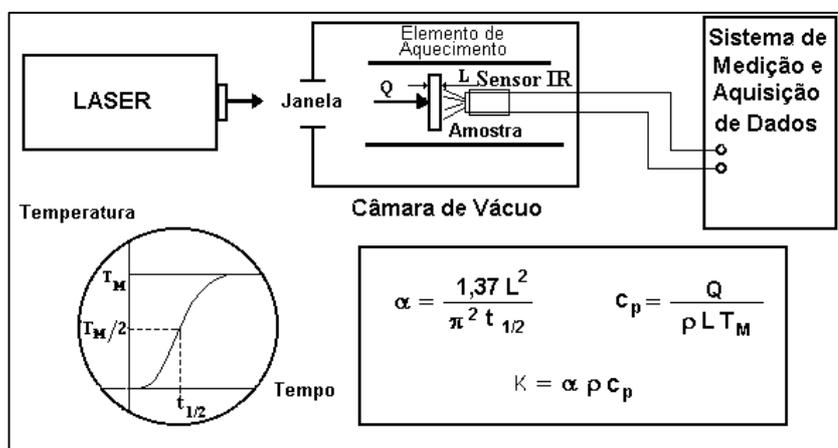


Fig. 1: Princípio do Método do Flash de Laser

A difusividade é calculada a partir da espessura da amostra, L , e do tempo, $t_{1/2}$, requerido para a temperatura da face oposta atingir a metade da excursão de temperatura. O calor específico é calculado a partir da temperatura máxima atingida na face oposta, da espessura e da massa específica do material. A condutividade térmica é então calculada pelo produto da difusividade pelo calor específico e pela massa específica do material.

Um método de adimensionalização da distribuição de temperatura resultante na face oposta pode ser aplicado, de modo que a curva experimental pode ser comparada com a curva teórica e assim, desvios em relação às condições ideais podem ser detectados e modelos matemáticos de correção aplicados [4-12] (Fig. 1). Este método tem sido usado para medir materiais cujas difusividades térmicas variam de $0,1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a $1000 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ em temperaturas de 80 K a 3000 K, atendendo assim materiais como metais, combustíveis nucleares, ligas diversas, cerâmicos, semicondutores, compósitos, líquidos, fibras de carbono, materiais reforçados com fibras, camadas individuais ou compósitos em camadas. Tem sido empregado, também, para medir a condutância de contato térmico em interfaces e compósitos dispersos. Técnicas para compósitos em camadas têm sido desenvolvidas possibilitando a utilização desse método em líquidos, filmes, condutância entre camadas, etc.

Na aplicação prática deste método, as condições experimentais reais nem sempre correspondem exatamente às condições de contorno idealizadas na teoria de Parker, sendo necessário o uso de fatores de correção, o que aumenta a incerteza de medição. O uso de modelos matemáticos válidos para obtenção de soluções numéricas da equação de difusão térmica permite reduzir os níveis de restrições com relação ao modelo original proposto. Assim, soluções numéricas a partir de modelos matemáticos, considerando as condições reais de medição, tornam-se mais atrativa para investigar os vários fenômenos físicos que são difíceis de serem investigados experimentalmente.

Neste trabalho é proposta uma metodologia para a estimativa da incerteza de medição baseada em um modelo matemático. Inicialmente, é apresentada uma revisão dos principais componentes de incerteza de medição da

difusividade térmica pelo método do Flash de Laser seguida da metodologia proposta. Exemplos ilustrativos para difusividade do Ferro puro e Pyroceram 9606 em 20 °C foram obtidos.

FONTES DE INCERTEZAS

O método do Flash de Laser é susceptível a uma série de grandezas de influências sendo que as principais fontes de incertezas que afetam a medição da difusividade térmica podem ser agrupadas da seguinte maneira: laser (tempo de pulso, uniformidade do laser, dentre outros), amostra, meio térmico, método (uso de hipóteses simplificadas e aproximações) e o usuário. É evidente que a contribuição de tais fontes de incertezas dependerá de cada situação particular e circunstância. Existem algumas técnicas para minimizar ou compensar tais fontes de incertezas, mas o mais importante é a seleção correta do sistema de medição de acordo com sua aplicação [13-14].

a) Laser

A incerteza devido à duração do pulso do laser dependerá das propriedades térmicas da amostra, das características do pulso (duração, energia e forma temporal). ~~Quando a duração do pulso não é negligenciável em comparação com o aumento do tempo, a origem do tempo é deslocada.~~ A presença isolada do efeito de pulso finito pode ser facilmente detectada ao se comparar a curva de resposta experimental normalizada e a curva teórica. Este efeito tende a diminuir o valor difusividade térmica, pois a energia é transmitida mais lentamente ao material, atrasando o transiente de temperatura e conseqüentemente aumentando o valor do tempo característico. A não uniformidade do feixe de laser depende da distribuição espacial e temporal de energia, ~~e do método de medição de temperatura na face oposta da amostra. Este componente de incerteza torna-se negligenciável quando a temperatura média da face oposta é medida com um detector infravermelho.~~ Incertezas nos efeitos de não linearidade das propriedades termofísicas se devem à variação de tais propriedades da amostra com a temperatura durante o ensaio. Estes efeitos (não uniformidade e não linearidade) são negligenciáveis limitando-se a energia do pulso a fim de minimizar o aumento da temperatura na face oposta da amostra a no máximo 5 K.

b) Amostra

As fontes de incertezas relativas à amostra se devem à qualidade da geometria da amostra (planicidade e paralelismo das faces), à sua composição química, às suas propriedades ópticas e termofísicas (ex.: isotropia, homogeneidade, opacidade, absorvidade e emissividade) e ao instrumento utilizado para medir a sua espessura (calibração e resolução). A espessura da amostra na temperatura T é calculada a partir de sua medição à temperatura ambiente. Logo, têm-se os componentes de incerteza associados com a expansão térmica da amostra, incluindo as incertezas do instrumento de medição de temperatura (calibração, resolução, tempo de resposta, etc).

c-) Meio térmico

As fontes de incertezas associadas ao meio térmico são devidas à temperatura do forno, sua estabilidade e homogeneidade, a natureza da atmosfera (gás inerte ou vácuo) e a outros parâmetros relacionados com a transferência de calor (ex.: condução de calor entre a amostra e o meio). Na troca térmica global, a condução de calor representa a menor parcela pois é minimizada quando se utiliza um sistema porta amostras com áreas de contato pontuais. A transferência de calor por convecção, basicamente pelo processo de convecção natural, também é minimizada quando se utiliza vácuo no interior do forno onde está posicionada a amostra. Em temperaturas de medição elevadas, ~~a~~ parcela mais significativa de trocasperdas térmicas ~~é se deve~~ a transferência de calor por radiação. ~~A variação das propriedades termofísicas com a temperatura torna-se significativa para temperaturas acima de 100 K, implicando em uma variação na difusividade térmica de até 10 % por graus Celsius.~~

d) Método

As incertezas relativas ao método de medição das propriedades termofísicas se devem basicamente às diferenças entre as condições experimentais reais e as assumidas como parâmetros de entrada pelo modelo (ex: tempo de duração do pulso, forma do pulso de energia aplicado pelo laser, fator de uniformidade do pulso, etc) e aos erros numéricos associados às soluções numéricas obtidas para a equação de difusão térmica (malhas temporal e espacial adotadas, critérios de convergência, erro de truncamento, método numérico utilizado, etc).

e) Usuário

As fontes de incertezas associadas ao usuário estão relacionadas com sua habilidade e conhecimento na medição das propriedades termofísicas, relacionados principalmente com a seleção dos limites máximos e mínimos de temperatura usados para normalizar a curva experimental, a correção do desvio da linha de base do termograma, e a medição da espessura da amostra.

MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem proposta considera as condições experimentais sob as quais são realizadas as medições das propriedades termofísicas. A geometria simulada é apresentada na Fig. 2.

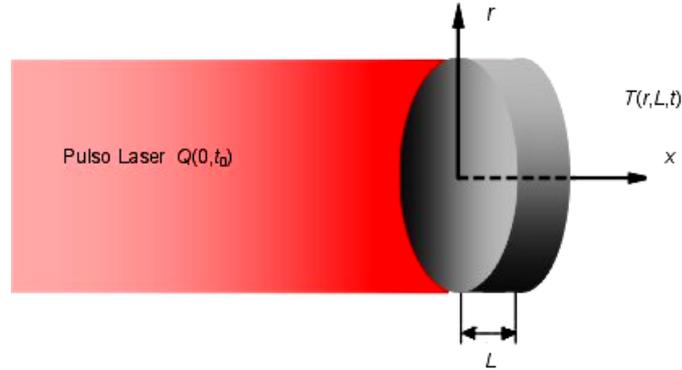


Fig. 2: Domínio matemático de análise do problema

A equação de difusão térmica em coordenadas axissimétricas e em regime transiente é dada por:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Em $t = 0$ s, a amostra se encontra na temperatura inicial T_0 . Sendo τ o tempo de aplicação do pulso de laser em uma pequena espessura da face frontal $0 < x < \delta$, as condições de contorno, no intervalo de tempo $0 < t \leq \tau$, são dadas por:

$$T(r, x, t) \Big|_{\substack{x \leq \delta \\ t < \tau}} = \frac{Q(r, x, t)}{\alpha c_p \delta} \quad (2)$$

e

$$T(r, x, t) \Big|_{\substack{x > \delta \\ t \leq \tau}} = T_0 \quad (3)$$

onde a energia radiante absorvida pela amostra é expressa por:

$$Q = \frac{P \cdot a \cdot \tau}{\pi \cdot r^2} \quad (4)$$

Para o $t > \tau$, as superfícies trocam calor com o ambiente. Assim a condição de contorno torna-se:

$$q = U \cdot s \cdot \Delta T. \quad (5)$$

A Eq. (1) é discretizada segundo o método de diferenças finitas com formulação em volumes de controle ou Método dos Volumes Finitos [15-18]. As propriedades termofísicas do material são incorporadas pelos coeficientes da equação de discretização em volumes finitos.

Soluções numéricas do processo de difusão térmica, considerando condições iniciais e de contorno reais, são obtidas para $x = L$.

~~Foram utilizadas técnicas de solução de problemas inversos do processo de difusão térmica e algoritmos de otimização.~~ As grandezas de entrada do modelo que foram investigadas estão apresentadas na Tab. 1, tanto para as simulações realizadas para o Ferro puro quanto para o Pyroceram 9606. Estes valores correspondem ao sistema de medição atualmente utilizado no Laboratório de Medição de Propriedades Termofísicas – LMPT do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN, exceto as estimativas para a densidade, onde os valores médios foram obtidos da referência [19] e as incertezas foram superestimadas para se verificar o seu efeito. Os valores de incerteza apresentados correspondem à incerteza expandida a um nível probabilidade de aproximadamente 95 %.

Tabela 1: Estimativa das grandezas de entrada da modelagem matemática

Símbolo	Grandeza	Estimativa	Unidade
τ	Tempo de pulso	$0,100 \pm 0,01$	s
P	Potência do laser	$20,0 \pm 2,3$	W
U	Coefficiente global de calor	$43,0 \pm 5,8$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
a	Absortividade da amostra	$0,95 \pm 0,06$	-
L	Espessura da amostra	$3,000 \pm 0,003$	Mm
ρ	Densidade: Ferro Puro	7870 ± 262	$kg \cdot m^{-3}$
	Densidade: Pyroceram 9606	2600 ± 87	$kg \cdot m^{-3}$

~~Para cada grandeza de entrada, foram obtidas duas soluções numéricas ótimas. Foram feitas duas simulações para cada grandeza de entrada,~~ considerando os valores limites de suas incertezas. Utilizou-se técnicas de solução de problemas inversos do processo de difusão térmica e algoritmos de otimização por mínimos quadrados. ~~e a~~ estimativa da incerteza padrão combinada da difusividade térmica, ~~e~~ da condutividade térmica e do calor específico foram obtidas segundo o Guia para a Expressão da Incerteza em Medição [20]. A função de densidade de probabilidade retangular foi assumida para cada grandeza de incerteza.

RESULTADOS

As tabelas 2 a 4 apresentam a influência de cada grandeza de entrada (componente de incerteza) na estimativa da incerteza padrão combinada da difusividade térmica, condutividade térmica e calor específico à temperatura de 20°C, respectivamente.

Tabela 2: Influência das grandezas de entrada na estimativa da incerteza padrão combinada da difusividade térmica do material à temperatura de 20 °C

Grandeza	Ferro Puro					Pyroceram 9606				
	$u_i(\alpha)$	Contribuição (%)	α $10^{-6} \cdot m^2 \cdot s^{-1}$	$u_c(\alpha)$		$u_i(\alpha)$	Contribuição (%)	α $10^{-6} \cdot m^2 \cdot s^{-1}$	$u_c(\alpha)$	
				$10^{-6} \cdot m^2 \cdot s^{-1}$	(%)				$10^{-6} \cdot m^2 \cdot s^{-1}$	(%)
τ	0,98	95,71	22,80	1,00	4,41	0,03	20,01	1,89	0,07	3,49
P	0,06	0,37				0,02	9,26			
U	0,05	0,24				0,02	6,04			
a	0,19	3,56				0,01	3,24			
L	0,03	0,07				0,05	61,44			
ρ	0,02	0,06				0,00	0,01			

Tabela 3: Influência das grandezas de entrada na estimativa da incerteza padrão combinada da condutividade térmica do material à temperatura de 20 °C

Grandeza	Ferro Puro					Pyroceram 9606				
	$u_i(k)$	Contribuição (%)	k W.m ⁻¹ .K ⁻¹	$u_c(k)$		$u_i(k)$	Contribuição (%)	k W.m ⁻¹ .K ⁻¹	$u_c(k)$	
				W.m ⁻¹ .K ⁻¹	(%)				W.m ⁻¹ .K ⁻¹	(%)
τ	8,16	69,48	80,20	9,79	12,21	0,33	46,29	3,98	0,49	12,36
P	4,46	20,75				0,31	40,42			
U	0,20	0,04				0,06	1,68			
a	3,05	9,69				0,17	11,59			
L	0,13	0,02				0,01	0,02			
ρ	0,13	0,02				0,00	0,00			

Tabela 4: Influência das grandezas de entrada na estimativa da incerteza padrão combinada do calor específico do material à temperatura de 20 °C

Grandeza	Ferro Puro					Pyroceram 9606				
	$u_i(c_p)$	Contribuição (%)	c_p J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	$u_c(c_p)$		$u_i(c_p)$	Contribuição (%)	c_p J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	$u_c(c_p)$	
				J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	(%)				J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	(%)
τ	25,86	40,05	447,00	40,86	9,14	55,45	40,96	1,89	86,63	10,72
P	25,78	39,80				54,85	40,08			
U	0,16	0,00				6,03	0,49			
a	13,29	10,58				28,95	11,16			
L	0,21	0,00				23,41	7,30			
ρ	12,64	9,57				0,30	0,00			

Na maioria dos casos, o tempo de pulso é o principal componente de incerteza das propriedades termofísicas (apesar de apresentar valores de contribuições percentuais diferentes), com exceção da estimativa da difusividade térmica do material Pyroceram 9606 cujo principal componente de incerteza é devido à espessura da amostra.

A incerteza da potência do laser também é fator significativo para a estimativa da incerteza de medição da condutividade térmica e do calor específico dos materiais.

Observa-se que a influência dos componentes de incerteza é distribuída de maneira não homogênea entre as grandezas de saída (difusividade térmica, condutividade térmica e calor específico). Conforme esperado, cada uma das grandezas de saída do modelo tem a capacidade de explicar de diferentes maneiras as alterações nas grandezas de entrada.

Por definição as propriedades termofísicas, condutividade térmica e calor específico, apresentam proporção direta e inversa respectivamente em relação à difusividade térmica. A avaliação das soluções numéricas mostrou que a condutividade térmica e o calor específico são diretamente correlacionados entre si, em especial para grandezas de entrada com maior contribuição nas incertezas padrão combinadas associadas a tais propriedades termofísicas. Desta forma, um efeito compensatório de anulação parcial das incertezas resultantes na difusividade térmica dos materiais é observado, reduzindo o seu valor percentual (tabela 2) em relação às incertezas percentuais associadas às outras duas propriedades termofísicas (tabelas 3 e 4).

Em geral, o tempo de pulso, a potência do laser, a espessura e a absorvidade do material são a grandezas que mais influenciam na estimativa da incerteza de medição da difusividade térmica, condutividade térmica e calor específico.

CONCLUSÕES

A análise das soluções numéricas indica que há uma correlação entre a condutividade térmica e o calor específico, em especial para grandezas de entrada com maior contribuição nas incertezas padrão combinadas associadas a tais propriedades termofísicas. Esta correlação contribui para a diminuição da incerteza padrão combinada estimada para a difusividade térmica.

O coeficiente de correlação entre as propriedades termofísicas não foi avaliado pois tais coeficientes dependem do tipo de material medido, faixa de temperatura de medição, tipo, valor médio e nível de incerteza das grandezas ou parâmetros de entrada, geometria da amostra, etc.

As contribuições percentuais de cada grandeza ou parâmetro de entrada variam significativamente de uma amostra para outra, em especial para a estimativa da incerteza combinada associada à difusividade térmica. Desta forma, a aplicação desta metodologia de modelagem matemática para avaliação das incertezas associadas às propriedades termofísicas necessita de um conjunto de diferentes amostras padrão para sua validação na faixa de medição do laboratório. A partir desta prática é possível ainda validar a estrutura matemática utilizada para a solução da equação de difusão térmica, bem como as condições iniciais e de contorno adotadas.

REFERÊNCIAS

1. E. Feita, H. Shaw, Advances in thermal properties testing at oak ridge national laboratories. *Ceramic Bulletin*, vol. 70, n. 1, pp. 125-28, 1991.
2. J. P. Holman, *Experimental Methods for Engineers*. McGraw-Hill, 6. ed., New York, 1994.
3. W. J. Parker, R.J. Jenkins, C.P. Butler, G.L. Abbott, Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity. *J. Appl. Phys.*, vol.32, n. 9, pp. 1679-1684, 1961.
4. R. E. Taylor, J. A. Cape, Finite Pulse-Time Effects in the Flash Diffusivity Technique, *J. Appl. Phys. Lett.*, vol. 5, n. 10, pp. 212-213, 1964.
5. R. D. Cowan, Pulse Method of Measuring Thermal Diffusivity at High Temperatures, *J. Appl. Phys.*, vol. 34, n. 4 (1), pp. 926-927, 1963.
6. J. A. Cape, G.W. Lehman, Temperature and Finite Pulse-Time Effects in the Flash Method for Measuring Thermal Diffusivity. *J. Appl. Phys.*, vol. 34, n. 7, 1963.
7. L.M. Clark, R.E. Taylor, Radiation Loss in the Flash Method for Thermal Diffusivity, *J. Appl. Phys.*, vol. 46, n. 2, pp. 714-719, 1975.
8. T. Azumi, Y. Takahashi, Novel Finite Pulse-Width Correction in Flash Thermal Diffusivity Measurement, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 52, n. 9, pp. 1411-1413, 1981.
9. R.C. Heckman, Finite Pulse-Time and Heat-Loss Effects in Pulse Thermal Diffusivity Measurements, *J. Appl. Phys.*, vol. 44, n. 4, pp.1455-1460, 1973.
10. T. Lechner, E. Hahne, Finite Pulse Time Effects in Flash Diffusivity Measurements, *Thermochimica Acta*, vol. 218, pp. 341-350, 1993.
11. J. Gembarovic, Nonlinear Effects in Laser Flash Thermal Diffusivity Measurements, *Inter. J. of Thermophysics*, vol. 25, n. 4, pp. 1253-1260, 2004.
12. R. A. N. Ferreira, O Miranda, A N. Dutra, P. A Grossi, et. al., Implantação no CDTN de Laboratório de Medição de Propriedades Termofísicas de Combustíveis Nucleares e Materiais através do Método Flash Laser. *Anais – 13 ° Encontro Nacional de Física de Reatores*, Rio de Janeiro, 2002.
13. B. Hay, J.R. Filtz, J. Hameury, L. Rongione, Uncertainty of Thermal Diffusivity Measurements by Laser Flash Method. *International Journal of Thermophysics*, vol. 26, n. 6, pp. 1883-1898, 2005.
14. B. Remy, A Degiovanni, Parameters Estimation and Measurement of Thermophysical Properties of Liquids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 48, pp. 4103-4120, 2005.
15. C.R. Maliska, C. R., *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1995.
16. S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, New York, 1980.
17. P.A Grossi, R.M. Andrade, R. A N. Ferreira, Ziviani, M. Solução da Equação de Difusão Térmica, Utilizando a Técnica de Volumes Finitos, para Otimização do Método Flash Laser, *Anais 2° Congresso Nacional Nacional de Engenharia Mecânica*, João Pessoa, 2002.
18. P A Grossi, Modelagem Físico-matemática de Sistemas de Determinação de Propriedades Termofísicas com Aplicação ao Método Flash Laser. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

19. F.P. Incropera, D.P. Wit, *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*, LTC, 3º ed, Rio de Janeiro, 1992.
20. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, *Guia Para a Expressão da Incerteza de Medição*, 2º ed, Rio de Janeiro, 1998.

UNIDADES E NOMENCLATURA

a	absortividade
c_p	calor específico ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
k	condutividade térmica ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
L	espessura da amostra (m)
P	potência do laser (W)
q	taxa de transferência de calor global (W)
Q	energia radiante ($W \cdot m^{-2}$)
r	distância radial (m)
s	área superficial total da amostra (m^2)
t	tempo (s)
$t_{1/2}$	tempo para o qual ocorre metade da variação de temperatura na face oposta (s)
T	temperatura (K)
T_M	máximo valor de temperatura na face oposta da amostra (K)
T_0	temperatura inicial (K)
U	coeficiente global de transferência de calor ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
u	incerteza padrão
u_c	incerteza padrão combinada
x	distância axial (m)
α	difusividade térmica ($m^2 \cdot s^{-1}$)
δ	espessura a partir da face frontal após aplicação do pulso de laser (m)
τ	tempo de aplicação do pulso de laser (s)
ρ	densidade ($kg \cdot m^{-3}$)