

## REVISÃO DO MÉTODO FLASH LASER

### Pablo Andrade Grossi

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN-CNEN, Cidade Universitária, Pampulha, CEP: 30.123-970 - Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil – [pabloag@cdtn.br](mailto:pabloag@cdtn.br)

### Roberto Márcio de Andrade

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Pampulha, CEP: 31.270-901 - Belo Horizonte, Minas Gerais – [rma@ufmg.br](mailto:rma@ufmg.br)

### Ricardo Alberto Neto Ferreira

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN-CNEN, Cidade Universitária, Pampulha, CEP: 30.123-970 - Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil – [rnc@cdtn.br](mailto:rnc@cdtn.br)

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma revisão enfocando sistemas de medição de propriedades termofísicas de materiais com aplicação ao Método Flash Laser. A revisão apresenta uma nova forma de tratamento dos problemas frequentemente encontrados nestas técnicas. Foi desenvolvida uma modelagem físico-matemática onde a solução inversa da equação de difusão térmica, obtida a partir da aplicação de um algoritmo de otimização, baseado no método das coordenadas descendentes (Luenberger, 1984), tem por objetivo minimizar a função desvio entre os resultados experimentais e a solução numérica. As variáveis de busca secundárias do modelo foram ajustadas à bancada de medição de propriedades termofísicas pelo Método Flash Laser do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN. As vantagens deste tipo de formulação físico-matemática, proposta para o Método Flash Laser, são: determinação simultânea da difusividade térmica, calor específico e condutividade térmica do material; eliminação dos métodos de correção propostos na literatura; possibilidade de aplicação da modelagem físico-matemática em outros métodos para determinação de propriedades termofísicas, considerando um menor grau de simplificação das condições iniciais e de contorno, conferindo maior adequabilidade do modelo matemático ao experimento, um maior significado físico aos resultados e conseqüente diminuição das incertezas.

**Palavras-chave:** Modelagem Físico-Matemática, Determinação de Propriedades Termofísicas, Método Flash Laser, Solução Inversa do Problema de Difusão de Calor, Algoritmos de Otimização.

### 1. Introdução

As propriedades termofísicas de materiais retratam o comportamento das interações intermoleculares da matéria em processos de transporte de energia. Assim, tais propriedades são importantes na caracterização e distinção dos diferentes tipos de materiais, visando a adequabilidade de determinados tipos em detrimento de outros.

Os avanços atuais na área de novos materiais (metálicos, cerâmicos, compósitos, biomateriais etc.) e as suas aplicações industriais, em tecnologias de ponta e nas faixas mais extremas de temperatura, têm mostrando a importância da determinação das propriedades termofísicas destes materiais (difusividade térmica, condutividade térmica, calor específico) em função da temperatura (Feit e Shaw, 1991).

Os vários métodos existentes para determinação de difusividade térmica são baseados na natureza do processo de transferência de calor em regime transiente, podendo ser uma análise de fluxos de calor periódicos ou de fluxos de calor não periódicos. Alguns inconvenientes como longo tempo requerido na realização das medições, necessidade de amostras grandes do material ou ainda elevados percentuais de incertezas de medição, impõem limitações na aplicação de alguns destes métodos para determinação de propriedades termofísicas.

O Método Flash Laser, apresentado e discutido primeiramente por Parker et al. (1961), é baseado na solução analítica da equação de difusão térmica unidimensional. O método analisa os resultados de um experimento no qual uma amostra cilíndrica, sob condições de contorno adiabáticas, é submetida a um impulso inicial de energia em uma das faces. A variação no perfil de temperatura da face oposta é medida durante o período de teste que é de aproximadamente 3 segundos. Com base na curva de temperatura, obtida experimentalmente, a difusividade térmica é determinada a partir da espessura da amostra e do tempo no qual a temperatura na face oposta atinge a metade da variação máxima de temperatura.

Apesar das inúmeras vantagens do método flash laser, algumas obstáculos experimentais vem sendo encontrados. A solução analítica da equação de difusão térmica, proposta por Parker et al. (1961), impõe algumas simplificações que induzem a limitações de ordem física. Os problemas são basicamente gerados pela dificuldade em fornecer as condições iniciais e de contorno exigidas pelo método. Algumas soluções corretivas são relatadas e discutidas, na literatura, com o intuito de amenizar as principais dificuldades. As principais correções apresentadas são:

- influência da forma do pulso de energia emitido pelo laser, (Parker et al., 1961; Heckman, 1972; Grossi 2003; Grossi et al. 2002);
- efeito do tempo de pulso finito do laser, que teoricamente deve ser infinitesimal, em relação ao transiente de temperatura na face oposta da amostra, (Grossi 2003; Grossi et al. 2002; Cape e Lehman, 1963; Taylor e Cape, 1964; Heckman, 1972; Takahashi e Murabayashi, 1975);

- efeito do aquecimento não uniforme da amostra, (Takahashi e Murabayashi, 1975);
- incerteza na medição da variação de temperatura na face oposta (Grossi 2003; Grossi et al. 2002; Taylor, 1978);
- efeito das trocas térmicas entre a amostra e o ambiente durante o experimento, (Parker e Jenkins, 1962; Cowan, 1962; Cape e Lehman, 1963; Watt, 1966; Heckman, 1972; Grossi 2003; Grossi et al. 2002).

Os modelos adicionais propostos estão voltados para a correção dos efeitos citados acima. Por se tratar de ajustes a posteriori, em sua maioria requerem tempo excessivo e difíceis formas de implementação, e desta forma, não se têm notado avanços significativos no desenvolvimento do Método Flash Laser.

Os objetivos principais deste trabalho são apresentar de um modelo físico-matemático que revisa e propõe uma nova forma de tratamento dos problemas freqüentemente encontrados em técnicas de determinação de propriedades termofísicas e uma aplicação desta revisão ao método Flash Laser.

## 2. Aplicação do Modelo Físico-Matemático ao Método Flash Laser

A motivação para propor uma revisão ou reavaliação para o Método Flash Laser está vinculada aos problemas encontrados ao se propor uma montagem experimental para medição de propriedades termofísicas baseada na metodologia apresentada por Parker et al. (1961).

Grossi (2003) apresenta uma metodologia de análise de sistemas experimentais de determinação de propriedades termofísicas que divide a montagem em três módulos: fonte de calor, amostra e sistema de medição de temperatura. A Figura. 2.1 visualiza os módulos da bancada experimental do Laboratório de Medição de Propriedades Termofísicas do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – LMPT/CDTN

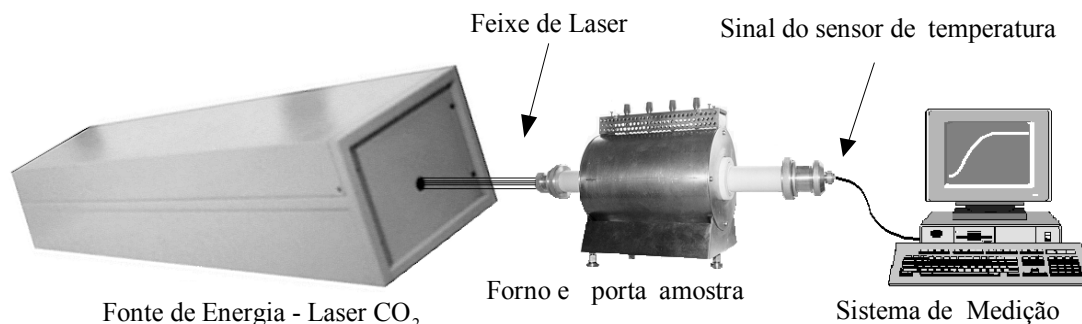


Figura 2.1 - Esquema da Bancada de Medição de Propriedades Termofísicas de Materiais através do Método Flash de Laser do LMPT-CDTN.

Esta divisão permite atuar de uma forma mais eficaz nos emergentes problemas decorrentes das limitações práticas de cada montagem experimental.

Modelos físicos que consideram diferentes processos físicos como transformação de energia elétrica em térmica, transferência de energia para a amostra (por condução ou radiação), difusão de calor no interior da amostra e transformação de energia térmica em elétrica (no processo de medição dos transientes de temperatura) são condensados em uma estrutura matemática que busca uma otimização de todas as variáveis envolvidas nos processos.

Grossi et al. (2004) e Grossi (2003) apresentam as principais variáveis relativas aos processos físicos envolvidos em aplicações práticas do Método Flash Laser. Uma estrutura matemática obtida a partir da aplicação de um algoritmo de otimização, baseado no método das coordenadas descendentes (Luenberger, 1984), minimiza o desvio entre os transientes de temperatura experimentais e os obtidos a partir das simulações numéricas obtidas por técnicas de volumes finitos (Patankar, 1980) no módulo referente à amostra e técnicas de identificação de sistemas (Aguirre, 2000) nos módulos de fonte de calor e sistema de medição de temperatura. As simulações numéricas consideram faixas de valores para as condições iniciais, de contorno e experimentais que mais se adaptem modelo físico utilizado pelo Método Flash Laser. Assim, as simplificações propostas por Parker et al. (1961) não necessitam serem feitas, pois os fenômenos e processos físicos, objeto das simplificações, agora estão incorporados ao modelo físico-matemático. A formulação para o problema é concretizada da seguinte forma:

$$\text{Min } f(x) \quad \text{sendo } x = [k, \rho, c_p, \tau, \phi, \Psi, \Pi, \varepsilon, \alpha_{\text{abs}}]^T \quad (2.1)$$

onde  $x$  é o vetor que contém as variáveis de busca associadas aos fenômenos físicos presentes em processos de determinação de propriedades termofísicas. A variável  $\phi$  é a forma do pulso laser,  $\Psi$  é o coeficiente característico de trocas térmicas,  $\Pi$  é o coeficiente amplitude do transiente da solução numérica, relativo à composição do valor da energia entregue à amostra e das perdas de amplitude introduzidas pelo sistema de medição de temperatura,  $\varepsilon$  é a emissividade da superfície da amostra e  $\alpha_{\text{abs}}$  é a absorvidade da face frontal da amostra.

A função objetivo,  $f(x)$ , é uma função discreta no tempo, definida como:

$$f(x) = \sum_{t=0}^{t=t_m} [T_E(t) - T_{SN}(t)]^2 \quad (2.2)$$

onde  $t$  é que se comporta como uma variável discreta (sendo incremento temporal definido pela frequência de amostragem do sistema de medição),  $T_E$  representa os valores de temperatura experimentais na face oposta e  $T_{SN}$  são os valores de temperatura na face oposta obtidos pelas soluções numéricas baseadas em técnicas de volumes finitos (para o processo difusivo na amostra) e técnicas de identificação de sistemas (para os processos de aplicação do fluxo de calor e medição de temperatura).

A minimização de  $f(x)$  está sujeita a restrições que são impostas para conferir uma interpretação física confiável aos resultados. Sendo assim, uma estimativa inicial da faixa mais provável para os valores das variáveis do problema possibilita uma convergência mais rápida e garante uma interpretação física para os resultados. O número de faixas e o tamanho de cada uma irão depender da quantidade de informações que se tem a respeito do material, da influência das alterações de cada variável e da velocidade que se deseja para a convergência. Dessa forma, um processo de restrição que considera os valores mais comumente encontrados ou esperados, define as faixas de variação das variáveis, aplicadas aos interesses deste trabalho. Essas faixas são apresentadas a seguir:

Condutividade térmica ( $k$ ): o espectro para esta propriedade está entre  $10^3$  e  $10^{-6}$  [W/(m.K)], abrangendo desde materiais altamente condutores, até os altamente isolantes.

Densidade ( $\rho$ ): os valores de densidade dos materiais se encontram na faixa entre  $10^4$  e  $10^0$  [kg/m<sup>3</sup>] que é relativamente pequena, sendo que para a maioria dos casos é da ordem de  $10^3$ .

Calor específico ( $c_p$ ): em geral assume valores da ordem de  $10^3$  e  $10^{-1}$  [J/(kg.K)], representando a capacidade de retenção de energia na estrutura do material.

Estas três primeiras variáveis influenciam diretamente no valor da difusividade térmica do material, portanto merecem uma atenção especial, pois estimativas incorretas podem comprometer a interpretação física do processo de solução do problema inverso. Sendo assim, estas variáveis são consideradas variáveis de busca primárias do processo de otimização. As variáveis mostradas a seguir serão consideradas variáveis de busca secundárias ou de influência indireta. Para as demais variáveis secundárias também devem ser estabelecidas faixas de domínio para os seus valores:

Tempo de duração do pulso laser ( $\tau$ ): possui um valor relativamente bastante estável em torno de 0,1 s. Estima-se que sua incerteza esteja na faixa de 5% (Grossi, 2003).

Forma do pulso laser ( $\phi$ ): esta variável pode representar diferentes tipos de perfis de irradiação da superfície da amostra. Os perfis mais representativos são os triangulares, os parabólicos e os trapezoidais.

Coefficiente característico de trocas térmicas ( $\Psi$ ): variável que modifica o transiente de temperatura de maneira similar a trocas térmicas. É efetivamente a composição coeficiente global de transferência de calor ( $h_g$ ), cujo valor inicial poder ser calculado para os três modos de transferência de calor, e as alterações causadas pelo sistema de medição, como por exemplo a saturação do sensor, que podem causar na saída um efeito similar ao de perdas de calor muito elevadas. Por este tipo de efeito nos resultados ocorrer de forma isolada, ele é de fácil detecção, sendo que estimativas iniciais inexatas não comprometem a solução final do problema inverso.

Coefficiente de amplitude do transiente da solução numérica ( $\Pi$ ): variável que afeta a magnitude do transiente de temperatura. É determinada pela composição de  $P_{laser}$ , cujo valor pode ser variado e medições instantâneas são realizadas por uma célula Peltier, e as variações de amplitude introduzidas pelos efeitos do sistema de medição de temperatura.

Emissividade e Absortividade superficial da amostra ( $\varepsilon$  e  $\alpha_{abs}$ ): possuem valores adimensionais que podem variar entre 0 e 1. Para faixas estreitas de variação de comprimento de onda, os valores de emissividade e absortividade podem ser considerados iguais, representando, respectivamente, a eficiência na qual a radiação infravermelha é emitida para o sensor de temperatura e a eficiência de absorção da energia emitida pelo laser. A solução numérica condensa estas duas variáveis em uma só que influencia diretamente na amplitude do transiente na face oposta.

De uma maneira generalizada, a influência do sistema de medição é minimizada ao ser incorporada pelas variáveis  $\phi$ ,  $\Psi$  e  $\Pi$ , que realizam um tratamento similar à aplicação de um filtro inverso no transiente de temperatura.

O método das coordenadas descendentes tem como principal objetivo encontrar um valor ótimo, para cada das variáveis de busca, que minimiza a função objetivo. A procura é realizada individualmente para cada uma das variáveis, podendo realizar a otimização de uma forma cíclica até que se atinja um valor mínimo exigido para a função objetivo.

Grossi et al. (2002) realizou um trabalho similar, entretanto mais simplificado. Utilizando como parâmetros as mesmas variáveis mostradas na Eq. (2.1), obteve, sem utilizar uma técnica de otimização, uma curva bem mais próxima da obtida experimentalmente. Realizou também uma comparação dos erros percentuais, nos pontos de amostragem, entre as curvas experimental e simulada (de maneira similar ao que faz a função objetivo, Eq. (2.2)). Entretanto não correlacionou estes resultados com valores das propriedades térmicas do material.

A validação da técnica mostrada neste trabalho, será baseada nos dados empíricos fornecidos pela bancada de medição pelo Método Flash Laser descrita por Ferreira et al (2002) e Grossi et al. (2001).

A Figura (2.2) apresenta um fluxograma da metodologia a ser utilizada pelo modelo físico-matemático. Uma implementação computacional do modelo físico-matemático foi realizado em linguagem Fortran, acoplado, sob a forma de uma sub-rotina, o programa CONDUCT a um programa principal de Otimização que visa à minimização da função objetivo dada pela Eq. (2.1). O programa desenvolvido que foi adaptado / configurado para o Método Flash Laser. Realizou-se o ajuste de suas variáveis de busca secundárias às características da bancada de medição. Este programa está sendo utilizado também no Laboratório de Medição de Propriedades Termofísicas através do Método Flash Laser, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), para a correção dos efeitos de tempo de pulso finito, forma de pulso, trocas térmicas e influência do sistema de medição de temperatura.

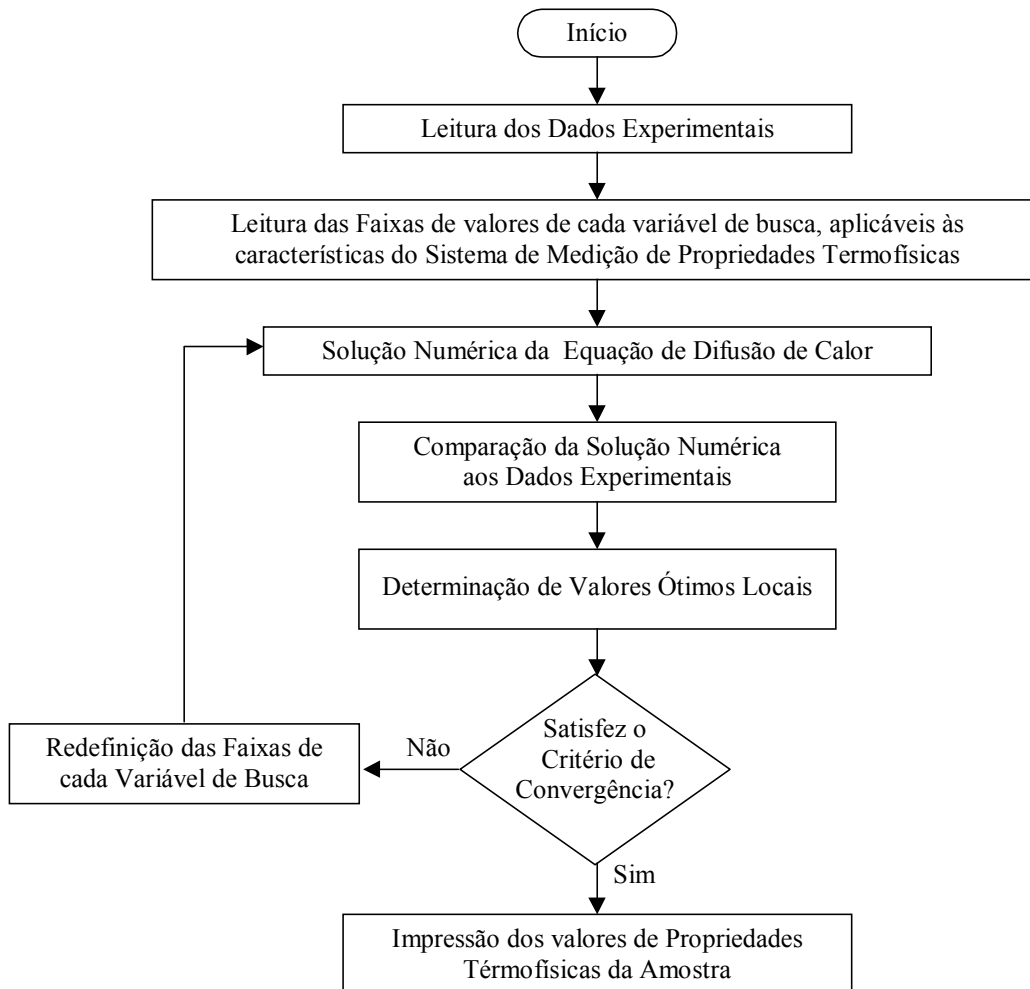


Figura 2.2 - Fluxograma do programa de modelagem físico-matemática aplicada a sistemas para determinação de propriedades termofísicas.

### 3. Resultados e Discussões

Com base nos valores medidos de  $k$  e  $\rho$ , apresentados nas Tab. (3.1) e (3.2), e no valor de calor específico estimado em  $440 \text{ J/kg.K}$  (com base na literatura) para uma amostra padrão de Aço, foram realizadas simulações do tipo Problema Inverso. A busca dos valores ótimos consiste em ajustar as variáveis secundárias de busca do modelo físico-matemático às características da bancada de medição do CDTN. A Tabela (3.3) apresenta os valores ótimos obtidos a partir deste ajuste.

Tabela 3.1 - Valores das medidas de condutividade para a amostra padrão de Aço medidos pelo Laboratório de Propriedades Superficiais do Departamento de Física da UFMG.

Amostra	Condutividade Térmica obtida ( $W/m^0C$ )	Condutividade Térmica Média ( $W/m^0C$ )
Aço (Padrão)	23	(28±3)
	26	
	30	

Os desvios mostrados são desvios estatísticos dos valores de condutividade térmica nas várias medidas realizadas e foram usados para dar uma ideia da flutuação nos resultados quando se usa condições diferentes (cargas de 10gr e 50gr) para a realização das medições.

Tabela 3.2 - Valores de densidade da amostra padrão de Aço medidas pelo CDTN através do Método de Penetração e Imersão em Água Deionizada.

<i>Peso da amostra no ar (g)</i>	<i>Peso em água (g)</i>	<i>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Densidade Média (kg/m<sup>3</sup>)</i>
0,7613	0,6617	7643,5743	7552,7931
0,7613	0,6605	7552,5794	
0,7607	0,6595	7516,7984	
0,7610	0,6590	7460,7843	
0,7613	0,6610	7590,2293	

Esta técnica se baseia na diferença de empuxo entre o peso da amostra no ar e o seu peso na água.

Tabela 3.3 - Valores ótimos para o ajuste das variáveis secundárias de busca do modelo matemático em relação à bancada de medição baseado em uma amostra padrão de Aço.

<i>Variável de Busca</i>	<i>Valor Ótimo do Ajuste</i>
$\tau$	0,1
$\phi$	Trapezoidal
$\Psi$	19562
$\Pi$	150
$\varepsilon$	0,96
$\alpha_{abs}$	0,96

A estimativa da variável  $\tau$  se baseou no valor mínimo de tempo de pulso que é bastante estável em torno de 0,1 s para esta montagem experimental. A variação é estimada em 5% e se deve a inércias mecânicas do sistema de aplicação do pulso como mostrado por Grossi (2003).

A norma ASTM 1461 - 92 adota para a forma de pulso do laser  $\phi$  um perfil de irradiação triangular. Entretanto, de acordo com a natureza mecânica de geração do pulso na bancada apresentada, o perfil de irradiação ótimo é um perfil trapezoidal.

A estimativa da variável  $\Psi$  foi baseada no percentual de decaimento do transiente de temperatura após o ponto de temperatura máxima. O valor ótimo encontrado é igual a 19562 onde se estima uma variação média de 15% para a sua faixa de amplitude.

A estimativa para  $\Pi$  se dá a partir da amplitude do transiente de temperatura. Um valor inicial é dado pela medida de potência do laser, fornecida por uma célula Peltier. O valor de potência do laser é variável e estabelecido de acordo com o tipo de material ensaiado. A este valor são adicionados os efeitos relacionados à variação de amplitude do sinal, induzidos pelas características do sistema de medição de temperatura. Desta forma, a magnitude da faixa de  $\Pi$  possui uma incerteza de 20% em relação ao valor ótimo de ajuste, que é 150.

Para a estimativa dos valores de emissividade e absorvidade superficiais das amostras utilizou-se uma metodologia de tratamento das superfícies com uma pre-deposição por vaporização (metalização) com ouro antes da deposição de uma finíssima camada de "carbon black" / grafite nas superfícies das amostras (Joo et al., 2000; Minato et al., 1997 e Degeldre et al., 1997). Obteve-se a padronização dos valores de absorvidade e emissividade das amostras, que passaram a ser igual aos da camada de carbono. De acordo com MIKRON (2003) a emissividade e a absorvidade da grafite, para a faixa de comprimento de onda de interesse desse artigo são iguais a 0,96.

Para melhor visualização dos resultados obtidos a Fig. (3.1) mostra uma comparação entre a solução numérica utilizando os valores ótimos das variáveis de busca secundárias, a curva experimental e a curva teórica obtida com base na solução analítica proposta por Parker (1961) para a amostra padrão de aço.

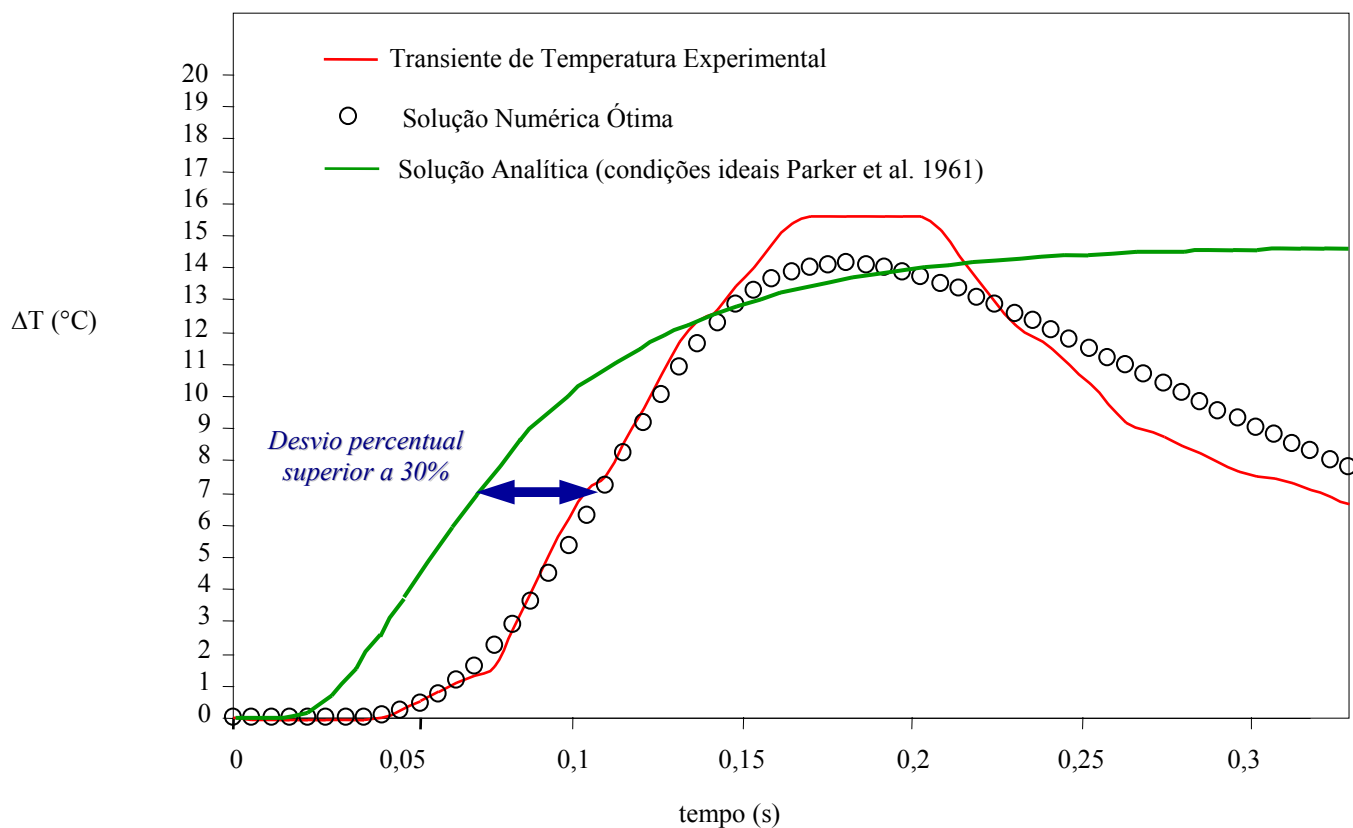


Figura 3.1 - Comparação entre o transiente de temperatura experimental e transiente numérico considerando os valores ótimos de ajuste à bancada de medição do CDTN.

#### 4. Conclusões e Sugestões

Os resultados de validação e ajuste do modelo matemático mostraram-se adequados à bancada de medição experimental de propriedades termofísicas através do Método Flash Laser. Observou-se a diminuição da incerteza de medição das propriedades térmicas com a utilização deste modelo. Desta forma é possível evitar a perda de significado físico do resultado final de medição e garantir a convergência do programa de busca da solução ótima.

As vantagens deste tipo de formulação físico-matemática de simulação para a análise de dados, proposta para o Método Flash Laser, são:

- Determinação simultânea das propriedades termofísicas, da Difusividade Térmica ( $\alpha$ ), da Capacidade Calorífica Volumétrica ( $\rho c_p$ ) e da Condutividade Térmica ( $k$ );
- Eliminação das necessidades de aplicação dos métodos de correção propostos na literatura, muitas vezes trabalhosos e que nem sempre alcançam resultados satisfatórios;
- A aplicação da modelagem físico-matemática ao Método Flash Laser mostrou-se bastante adequada, apresentando resultados satisfatórios que incitam e encorajam a aplicação desta modelagem físico-matemática a outros sistemas de determinação de propriedades termofísicas;
- Utilização de um modelo físico-matemático que considera um menor grau de simplificação das condições iniciais e de contorno em relação às encontradas experimentalmente, conferindo maior adequabilidade do modelo ao experimento, um maior significado físico aos resultados e conseqüente diminuição das incertezas.

Visualizando a aplicação e desenvolvimento de trabalhos futuros, podem-se indicar as seguintes pesquisas:

- Estimativa das incertezas de medição dos valores das propriedades termofísicas, observadas ao se utilizar o modelo físico-matemático proposto;
- Expansão da técnica de modelagem físico-matemática com aplicação a outros sistemas de determinação de propriedades termofísicas;
- Intercomparação entre os valores dos resultados finais de medição e suas incertezas utilizando as correções propostas pela norma ASTM 1461 - 92 e o modelo físico-matemático proposto;
- Realização de novas medições do valor de potência de emissão laser, utilizando métodos mais precisos, como calorímetros de fluxo, visto que o sistema de medição adotada se mostrou inadequado;
- Melhoria do sistema de medição de temperatura.

## 5. Referências Bibliográficas

- AGUIRRE, L.A., **Introdução à Identificação de Sistemas**, Editora UFMG, 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-E-1461-92**: standard test method for thermal diffusivity of solids by the flash method. In: \_\_\_\_\_. Annual book of ASTM standards. Philadelphia: ASTM. v. 14.02, p. 750-757. 1993.
- CAPE, J. A.; LEHMAN, G. W., Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity. **J. Appl. Phys** v. 34, n.7, 1963.
- COWAN, R. D. Pulse method of measuring thermal diffusivity at high temperatures. **J. Appl. Phys.**, v. 34, n.4, pt.1, p. 926-927, 1963.
- DEGUELDRE, C., et al. Energy transfer and thermal conductivity through inert matrix and nuclear fuel analogous materials. In: \_\_\_\_\_. Energy transfer and thermal conductivity through inert matrix and nuclear fuel analogous materials. Ibaraki-Ken: JAERI, p.1-19. (JAERI-Resarch 97-087), 1997.
- FEIT, E.; SHAW, H. Advances in thermal properties testing at oak ridge national laboratories. **Ceramic Bulletin**, v. 70, n. 1, p.125-28, 1991.
- FERREIRA, R. A. N.; MIRANDA, O.; DUTRA NETO, A.; GROSSI, P. A., MARTINS, G. A. S.; REIS, S. C.; ALENCAR, D. A.; SOARES FILHO, J. G.; LOPES, C. C.; PINHO, M. G., Implantação no CDTN de Laboratório de Medição de Propriedades Termofísicas de Combustíveis Nucleares e Materiais através do Método flash laser. In: ENFIR. ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DE REATORES,13, 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEN, 2002.
- GROSSI, P. A., ANDRADE, R. M., FERREIRA, A. N. Modelagem físico-matemática do processo de difusão térmica aplicada ao método flash laser, In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 3, 2004, Pará. **Anais...** Belém, 2004.
- GROSSI, P. A. **Modelagem físico-matemática de sistemas de determinação de propriedades termofísicas com aplicação ao método flash laser**. 2003. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- GROSSI, P. A., ANDRADE, R. M., FERREIRA, A. N., ZIVIANI, M. Solução da equação de difusão térmica, utilizando a técnica de volumes finitos, para otimização do método flash laser, In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2, 2002, Paraíba. **Anais...** João Pessoa, 2002.
- GROSSI, P. A., FERREIRA, A. N., ANDRADE, R. M., bancada experimental para medição de propriedades termofísicas de sólidos pela técnica flash laser. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 16, 2001. **Anais...** Uberlândia, 2001.
- GROSSI, P. A.; ANDRADE, R. M.; FERREIRA, A. N.; ZIVIANI, M. Determinação experimental de propriedades térmicas de materiais metálicos pelo método flash, In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 56, 2001. **Anais...** Belo Horizonte: ABM, 2001.
- HECKMAN, R. C., Finite pulse-time and heat-loss effects in pulse thermal diffusivity measurements. **J. Appl. Phys.** v. 44, n. 4, p.1455-1460, 1973.
- JOO, Y.; PARK, H.; CHAE, H.; LEE, J.; BAIK, Y. Measurements of thermal diffusivity for thin slabs by a converging thermal wave technique. Disponível em: <<http://www.symp14.nist.gov/PDF/THI01JOO.PDF>> Acesso em: 21 jan. 2003, In :SYMPOSIUM ON THERMOPHYSICAL PROPERTIES, 14, 2000, Boulder, **Proceedings...** Boulder, 2000. 19 p.
- LUENBERGER, D. G., **Linear and nonlinear programming**. 2. ed. New.York : Addison-Wesley, 1984. 491 p.
- MIKRON: Table Of Emissivity Of Various Surfaces For Infrared Thermometry. Disponível em: <<http://www.transmetra.ch/pdf/publikationen/emissivity.pdf>>. Acesso em: 17 de jan. 2003.
- MINATO, K.; AKANO, M.; FUKUDA, K.; SATO, S.; OHASHI, H. Thermal expansion and thermal conductivity of cesium molybdate. **J. Alloys and Compounds**, v.255, p.18-23, 1997.
- PARKER, W. J.; JENKINS, R. J., Thermal conductivity measurements on bismuth telluride in the presence of a 2 Mev Electron Bean. **Advanced Energy Conversion**, v. 2, p. 87-103, 1962.
- PARKER, W. J.; JENKINS, R. J.; BUTLER, C. P.; ABBOTT, G. L. flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity. **J. Appl. Phys.**, v.32, n. 9, p. 1679 - 84, 1961.
- PATANKAR, S. V., **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York : Hemisphere, 1980. p. 353.
- TAKAHASHI, Y.; MURABAYASHI, M., Measurement of thermal properties of nuclear materials by laser flash method. **Nucl. Sci. Technol.** v. 12, n. 3, 133-144, 1975.
- TAYLOR, R. E. Heat pulse thermal diffusivity measurements. School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana - PRL 154 [s. n.], 1978. 60p.
- TAYLOR, R. E.; CAPE, J. A. Finite pulse-time effects in the flash diffusivity technique. **J. Appl. Phys. Lett.** v. 5, n. 10, p. 212-213, 1964.
- WATT, D. A., Theory of thermal diffusivity by pulse technique. **Brit. J. Appl. Phys.**, v..17, p. 231-39, 1966.

## REVIEW OF THE FLASH LASER METHOD

### **Pablo Andrade Grossi**

Center of Development of the Nuclear Technology - CDTN-CNEN, Academical City, Pampulha, ZIP CODE: 30.123-970 - Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil – [pabloag@cdtn.br](mailto:pabloag@cdtn.br)

### **Roberto Márcio de Andrade**

Department of Mechanical Engineering of the Federal University of Minas Gerais - UFMG, Pampulha, ZIP CODE: 31.270-901 - Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil – [rma@ufmg.br](mailto:rma@ufmg.br)

### **Ricardo Alberto Neto Ferreira**

Center of Development of the Nuclear Technology - CDTN-CNEN, Academical City, Pampulha, ZIP CODE: 30.123-970 - Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil – [ranf@cdtn.br](mailto:ranf@cdtn.br)

**Abstract:** *This work presents a revision focusing systems of measurement of thermophysical properties of materials with application to the Método Flash Laser. The revision presents a new form of treatment of the problems frequently found in these techniques. A physical-mathematics modelling was developed where the inverse solution of the equation of thermal diffusion, obtained starting from the application of an optimization algorithm, based on the descending coordinates method (Luenberger, 1984), that minimize the deviation function between the experimental results and the numeric solution. Secondary search variables were adjusted to the thermophysical properties measurements carried out in the bench of the CDTN. These measurements were done in a standard sample. It was observed a good concordance between results. This kind of physics-mathematics modeling applied to flash laser method allows simultaneous determination of thermophysical properties ( $\alpha$ ,  $c_p$  and  $k$ ), elimination of the correction methods proposed in the literature and incentive the application of this kind of modeling in other methods used for determination of thermophysical properties. This modeling works with less constraints in initial and boundary conditions and leads to a better fitness between mathematical model and experimental results. As a consequence, the physical meaning of thermophysical properties is improved and the uncertainty in the results is reduced.*

**Keywords:** *Modelling Physical-mathematics, Determination of Propriedades Termofísicas, Método Flash Laser, Inverse Solution of the Problem of Diffusion of Heat*