

IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM COMPÓSITOS LAMINADOS ATRAVÉS DA ANÁLISE DE CONDUÇÃO DE CALOR COM TRANSFORMAÇÕES INTEGRAIS E DOMÍNIO ÚNICO

Fabricio da Silva Mascouto, mascouto@iprj.uerj.br¹
Luiz Alberto da Silva Abreu, luiz.abreu@iprj.uerj.br¹
Diego Campos Knupp, diegoknupp@iprj.uerj.br¹
Emerson de Lima Sanches, esanches@iprj.uerj.br¹
Leandro Alcoforado Sphaier, lasphaier@id.uff.br²

¹Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Rua Bonfim, 25, Vila Amélia, Nova Friburgo, RJ

²Universidade Federal Fluminense - Rua Passo da Pátria, 156, Boa Viagem, Niterói, RJ

Resumo: O presente trabalho aborda a identificação de falhas na região de junção de um compósito laminado, na qual ocorre a transição e a adesão de duas matrizes distintas do conjunto analisado. A solução do problema direto aborda uma metodologia híbrida, no qual o problema direto, formulado em domínio único, é resolvido pela Técnica da Transformada Integral Clássica, que gera um problema de autovalor, sendo por sua vez solucionado através do Método das Diferenças Finitas. A identificação das falhas é obtida através da estimativa do coeficiente de condutividade térmica em toda região que deveria haver o adesivo, através da formulação e solução de um problema inverso. No presente trabalho, utilizou-se a inferência Bayesiana com informação a priori Total Variation. As falhas são caracterizadas pela ausência de adesivo, e em seu lugar existe ar, que por sua vez, possui um coeficiente de condutividade térmica muito menor do que do adesivo. Assim, na presença de falhas, há uma variação abrupta do coeficiente ao longo da região do adesivo. Os resultados obtidos com medições simuladas demonstram que o método é capaz de identificar falhas.

Palavras-chave: Transferência de Calor, Identificação de Falhas, Domínio Único, Inferência Bayesiana, Variação Total.

1. INTRODUÇÃO

A formulação e solução de problemas que permitam avaliar a adesão entre dois ou mais materiais tem grande importância em diversas áreas do conhecimento, como a eletrônica, telecomunicação, aviação, indústrias da defesa e petrolífera, entre muitas outras. Em geral, utilizando a técnica de termografia por infravermelho para a detecção não intrusiva de falhas entre juntas de compósitos laminados, é muito comum que a avaliação seja puramente qualitativa. Assim, existem esforços para que o conhecimento sobre transferência de calor seja aplicado para serem realizadas análises de forma quantitativa. Nem sempre apenas com ensaios qualitativos é possível identificar falhas de adesão ou aderência, muitas vezes os gradientes de temperatura provocados por regiões de falhas são muito pequenos ou mesmo em algumas situações a espessura dos materiais e suas temperaturas de transição vítrea impedem que grandes gradientes sejam provocados e as falhas sejam identificadas apenas pela imagem termográfica (Meola and Carlomagno, 2004 e Abreu *et al.*, 2014a).

Trabalhos recentes têm sido publicados analisando a qualidade de adesão entre compósitos laminados através de uma modelagem considerando a existência de uma resistência térmica de contato entre as camadas destes compósitos (Abreu *et al.*, 2014a; Abreu *et al.*, 2014b e Abreu *et al.*, 2016). Nestes trabalhos, a qualidade da adesão é verificada através da solução do problema inverso de transferência de calor de identificação da condutância térmica de contato na interface entre os materiais, utilizando medições de temperatura superficiais. Esta modelagem tem se mostrado eficiente quando a camada de adesivo é muito fina e sua espessura pode ser desprezada. Entretanto, casos como nas junções de tubulações utilizando compósitos GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), as camadas de adesivo chegam a 2 mm de espessura e esta abordagem pode não ser a mais adequada. Recentemente estes tubos têm sido utilizados na indústria do petróleo para transporte de água ou óleo sob temperaturas moderadas. Em vista dos problemas ambientais e econômicos causados pela falha destes materiais, é extremamente importante e necessário a busca de técnicas capazes de monitorizar, avaliar e assegurar a integridade destas juntas adesivas GFRP (Grosso *et al.*, 2013 e Grosso *et al.*, 2016).

Neste trabalho, propõe-se um modelo matemático visando analisar a qualidade da adesão de meio compósitos em problemas cuja espessura da camada de adesivo seja superior a 0.5mm. Propõe-se analisar esta adesão, através da solução

de um problema inverso de condução de calor, a ser resolvido numa abordagem Bayesiana utilizando o método de Monte Carlo com Cadeias de Markov (Kaipio and Somersalo, 2005; Christen and Fox, 2005; Orlande, 2012; Orlande *et al.*, 2014 e Abreu *et al.*, 2014a). Este problema inverso consiste na identificação da condutividade térmica da camada de adesivo, a partir de medições não intrusivas de temperatura supostamente tomadas numa das superfícies do meio composto. Espera-se que a identificação da variação espacial da condutividade térmica revele posições espaciais onde não haja adesivo, uma vez que a condutividade térmica deste material é muito superior a condutividade térmica do ar (que preenche os espaços sem adesivo). Para a formulação e solução do problema direto, é empregada uma modelagem em domínio único, que se mostra muito apropriada por permitir que a mesma abordagem seja empregada em casos com diferentes números de camadas, e diferentes geometrias. O problema resultante é então resolvido com uma combinação de transformações integrais e diferenças finitas.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO DO PROBLEMA DIRETO

Considere a análise de uma região da parede de um tubo cilíndrico, de tal modo que o problema seja simplificado e apresentado em coordenadas cartesianas, como ilustra a Figura 1. Considera-se que o tubo é revestido com um isolante térmico, aplicado por meio do contato com uma camada de adesivo. É considerado ainda que na região analisada existe uma falha na aplicação do adesivo, sendo representada por uma pequena região de ausência deste material, onde é considerada a presença de ar, por exemplo devido à formação de uma bolha na aplicação.

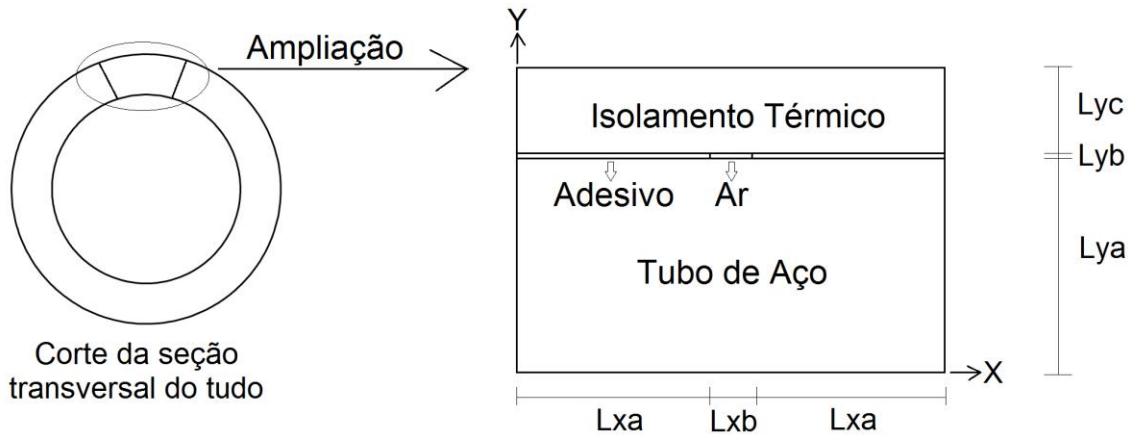


Figura 1. Representação esquemática do problema.

Considera-se um fluxo de calor q'' prescrito no interior da superfície do tubo, enquanto a superfície externa troca calor por convecção com o ambiente circundante em temperatura T_∞ , e considerando ainda um coeficiente de transferência de calor h .

Este problema pode ser modelado pelas seguintes equações por meio de uma formulação em domínio único (Cotta *et al.*, 2015):

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

$$\left. \frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (1.b)$$

$$\left. \frac{\partial T(L_x, y, t)}{\partial x} \right|_{x=L_x} = 0 \quad (1.c)$$

$$-k(x, y) \frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} \bigg|_{y=0} = q'' \quad (1.d)$$

$$k(x, y) \frac{\partial T(x, L_y, t)}{\partial y} \bigg|_{y=L_y} + hT(x, L_y, t) = hT_\infty \quad (1.e)$$

$$T(x, y, 0) = T_0 \quad (1.f)$$

onde $\rho(x, y)$ é a massa específica, $c_p(x, y)$ é o calor específico, $k(x, y)$ é a condutividade térmica, todos eles com variação espacial de modo a representar as propriedades de cada um dos materiais (parede do tubo, adesivo, isolante e ar), apresentando transições abruptas nas interfaces destas regiões.

A solução do problema direto é realizada através da Técnica da Transformada Integral Clássica (CITT) (Mikhailov e Özisik, 1984), com formulação em Domínio Único (Knupp *et al.*, 2012) e o problema de autovalor gerado é resolvido através do Método das Diferenças Finitas (MDF) (Patankar, 1980). A solução do problema direto é apresentada detalhadamente em Knupp *et al.* (2017).

3. VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA

O coeficiente de Condutividade térmica tem variação nas duas direções espaciais, como é apresentado na Figura 2, para o Caso 1, estudado posteriormente.



Figura 2. Variação bidimensional do coeficiente de condutividade térmica.

Entretanto, o coeficiente está sendo analisado no momento é modelado, com variação espacial apenas na direção espacial x , pela seguinte função

$$k(x, y) = \begin{cases} 0,7 & \text{para } x < 0,45 \\ 0,0263 & \text{para } 0,45 \leq x \leq 0,55 \\ 0,7 & \text{para } x > 0,55 \end{cases} \quad (2)$$

Esse comportamento do coeficiente de Condutividade Térmica é válido para as posições de y entre $0,050 < y < 0,051$ metro, justamente o local onde é usado o adesivo para aderir os dois materiais e onde será realizada a análise. A Figura 3 representa a variação unidimensional do coeficiente de condutividade térmica no adesivo. Os resultados a seguir, tentam recuperar parâmetros discretos, para interpolados, poderem modelar a função.

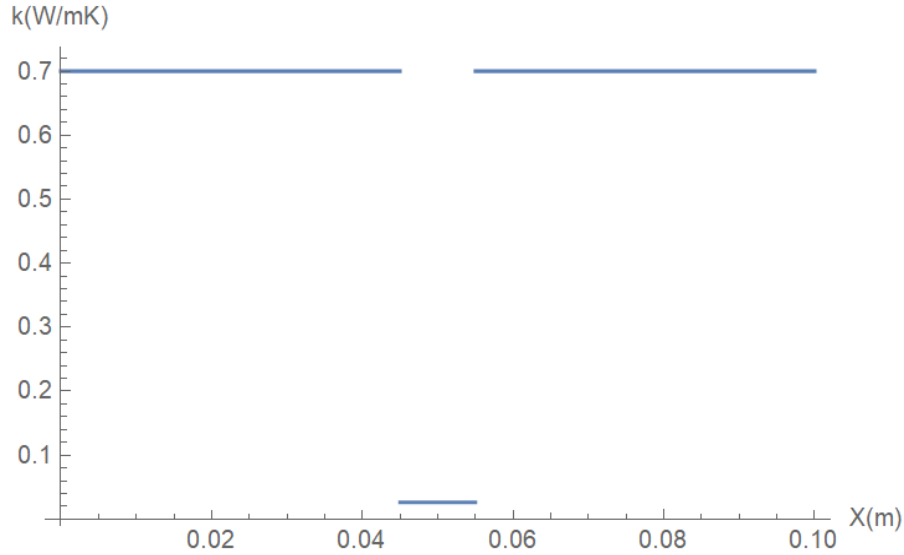


Figura 3. Variação unidimensional do coeficiente de condutividade térmica no adesivo.

4. FORMULAÇÃO E SOLUÇÃO DO PROBLEMA INVERSO

O problema inverso de transferência de calor, consiste na estimativa do coeficiente de condutividade térmica ao longo do adesivo. Para isto, foram utilizadas medições de temperatura obtidas na superfície superior do isolante térmico. Para a solução do problema inverso foi utilizada uma abordagem Bayesiana como o Método de Monte Carlo via Cadeia de Markov (Kaipio e Somersalo, 2005 e Orlande, 2012) implementado através do algoritmo Metropolis-Hastings.

Foram adotadas as seguintes hipóteses para resolução do problema inverso: os parâmetros e os erros de medida são variáveis aleatórias independentes, com distribuições Gaussianas, médias e matrizes de covariâncias conhecidas, e ainda que os erros de medidas sejam aditivos. O mecanismo formal usado para combinar as medidas com a informação previamente disponível (priori) é o teorema de Bayes: (Kaipio and Somersalo, 2005; Orlande, 2012 e Abreu *et al.*, 2014a):

$$\pi(\mathbf{P} | \mathbf{T}^{exp}) = \frac{\pi_{pr}(\mathbf{P}) \cdot \pi(\mathbf{T}^{exp} | \mathbf{P})}{\pi(\mathbf{T}^{exp})} \quad (3)$$

onde $\mathbf{P}$ é o vetor de parâmetros que se deseja estimar, $\pi(\mathbf{P} | \mathbf{T}^{exp})$ é a função de densidade de probabilidades *a posteriori*, que se deseja estimar, $\pi_{pr}(\mathbf{P})$ é a função de densidade de probabilidades *a priori*, $\pi(\mathbf{T}^{exp} | \mathbf{P})$ é a função de máxima verossimilhança, $\pi(\mathbf{T}^{exp})$ é a densidade marginal, que exerce o papel de constante de normalização e $\mathbf{T}^{exp}$ são os dados experimentais.

Assumindo que as medições são tomadas com um intervalo de Δx , de $x=0$ até $x=0,10m$, o vetor contendo as medições pode ser escrito como:

$$\mathbf{T}^{exp} = \{T_1^{exp}, T_2^{exp}, \dots, T_{np}^{exp}\} \quad (4)$$

Considera-se, portanto, que os erros associados às medições têm distribuição normal cuja função de verossimilhança pode ser definida como (Orlande, 2012):

$$\pi(\mathbf{T}^{exp} | \mathbf{P}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{nd} \cdot |\mathbf{V}^{-1}|}} \exp \left[-0,5 \left(\mathbf{T}^{exp} - \mathbf{T}^{cal} \right)^T \mathbf{V}^{-1} \left(\mathbf{T}^{exp} - \mathbf{T}^{cal} \right) \right] \quad (5)$$

onde $\mathbf{V}^{-1}$ é a matriz inversa de covariância relacionada aos dados experimentais e np é o número total de medições, neste trabalho $np \cdot \Delta x = 0,10m$.

Considerou-se na solução do problema inverso uma discretização da função do coeficiente de condutividade térmica, assim foram estimados os valores desta função nas mesmas posições onde às medidas foram tomadas. Desta forma, o vetor de parâmetros pode ser escrito como:

$$\mathbf{P} = \{k_1, k_2, \dots, k_{np}\} \quad (6)$$

O Método MCMC foi implementado através do algoritmo de Metropolis-Hasting., descrito a seguir:

- 1) Iniciar o contador em 0 e definir um candidato inicial $\mathbf{P}^0$;
- 2) Gerar um candidato $\mathbf{P}^*$ a partir de uma distribuição auxiliar $\pi(\mathbf{P}^* | \mathbf{P}^t)$

$$k(\mathbf{P}_j^*, \mathbf{P}_j^{i-1}) = U[\text{Max}(0, \mathbf{P}_j^{i-1} - \delta), \mathbf{P}_j^{i-1} + \delta] \quad (7)$$

onde U representa uma distribuição uniforme.

- 3) Calcular o fator de aceitação β

$$\beta = \min \left[1, \frac{\pi(\mathbf{P}^* | \mathbf{T}^{exp})s(\mathbf{P}^* | \mathbf{P}^t)}{\pi(\mathbf{P}^t | \mathbf{T}^{exp})s(\mathbf{P}^t | \mathbf{P}^*)} \right] \quad (8)$$

- 4) Gerar o número randômico $r \sim U(1, 0)$, que é um número aleatório gerado entre 0 e 1;
- 5) Se $\beta \geq r$, o candidato é aceito na cadeia ($\mathbf{P}^{t+1} = \mathbf{P}^*$). Caso contrário, o candidato é rejeitado e o estado anterior da cadeia é repetido ($\mathbf{P}^{t+1} = \mathbf{P}^t$);
- 6) Incrementar uma unidade no contador e retornar ao passo 2.

Como informação *a priori* utilizou-se, a *Total Variation* (TV), que baseia-se no princípio de que os sinais com detalhes excessivos e possivelmente falsos têm uma variação total elevada, ou seja, a integral do gradiente absoluto do sinal é alta. Além da TV, associou-se o fato de que a condutividade térmica é sempre positiva. A Variação Total de Parâmetros é um dos tipos de informação *a priori* do tipo Markov Random Field. Segundo Kaipio *et al.* (2005) a *a priori* de TVF é dada por:

$$\pi(\mathbf{P}) \propto \exp[-\gamma \text{TV}(\mathbf{P})] \quad (9)$$

onde $\text{TV}(\mathbf{P})$, para o problema inverso em questão, apresentado anteriormente

$$\text{TV}(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^{NP-1} \Delta x [|\mathbf{P}(x_i) - \mathbf{P}(x_{i+1})| + |\mathbf{P}(x_i) - \mathbf{P}(x_{i-1})|] \quad (10)$$

onde NP é o número de parâmetros discretos a serem estimados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram considerados dois casos para a identificação de falhas no adesivo de junção. Em ambos, os estados de aquecimento foram descartados e não considerados para fins estatísticos. Neste trabalho foram utilizados dados experimentais sintéticos, obtidos utilizando um processo de adição de ruídos à solução do problema direto. Os dados simulados foram gerados assumindo medições realizadas na superfície externa do tudo, $y=0,071\text{m}$. Para ambos os casos os dados experimentais sintéticos foram simulados nos instantes de tempo 5000, 10000 e 20000 segundos

Com a finalidade de evitar que haja crime inverso (Özisik e Orlande, 2000 e Kaipio e Somersalo, 2005), os dados experimentais sintéticos foram gerados solucionando o problema direto considerando a variação abrupta da massa específica e do calor específico. Entretanto, no algoritmo de Metropolis-Hastings, não foi considerada variação para esses dois parâmetros.

Em todos os casos apresentados para a solução do problema inverso foi considerado como estado inicial da cadeia de Markov o valor uniforme de $k(x)=0,7\text{W/mK}$ para todos os parâmetros. Este valor corresponde a condutividade térmica do adesivo. É importante salientar que, o objetivo deste trabalho não visa estimar a condutividade térmica do adesivo, e sim identificar regiões de falhas. Isto viabiliza utilizar o próprio coeficiente da cola como estado inicial no vetor de parâmetros.

Para a TVF, utilizou-se um hiperparâmetro $\gamma=10^6$, definido após testes numéricos em cada situação. O hiperparâmetro suaviza a derivada que aparece na informação *a priori* TVF. A estimativa da função da condutividade térmica foi realizada com $NP=41$ pontos discretos, em todos os casos.

Para a solução do problema direto, na geração dos dados experimentais sintéticos e em cada estado das cadeias de Markov, foi utilizada uma ordem de truncamento das autofunções $N=10$, na CITT, e para o problema de autovalor $NP_x=41$

e $NP_y=101$, no MDF. Assumiu-se que a superfície exterior do tudo esteja exposta a uma temperatura ambiente $T_\infty=20^\circ$, igual a temperatura inicial, com coeficiente de troca térmica $h=15\text{W/m}^2\text{K}$.

Assumindo-se que os materiais do compósito laminado apresentam as seguintes propriedades: $k_{aço} = 13,4\text{W/mK}$, $k_{adesivo} = 0,7\text{W/mK}$, $k_{isolante} = 1,171\text{W/mK}$, $k_{ar} = 0,0263\text{W/mK}$, $\rho cp_{aço} = 3,86\text{MJ/m}^3\text{K}$, $\rho cp_{adesivo} = 1,75\text{MJ/m}^3\text{K}$, $\rho cp_{isolante} = 2,65\text{MJ/m}^3\text{K}$, $\rho cp_{ar} = 1,17\text{J/m}^3\text{K}$ (Incropera *et al.* e 2007; Grosso *et al.*, 2016). Considerou-se ainda um fluxo de calor de $q'' = 1500\text{W/m}^2$.

5.1. Caso 1

Para o Caso 1 foram gerados 70000 estados para a cadeia de Markov, sendo considerado como período de aquecimento os 20000 primeiros estados da cadeia. O perfil de temperaturas indica um gradiente de temperatura próximo da posição $x=0,05$ e $y=0,05$, região onde deveria existir o adesivo de junção. Assim seria possível inferir que existe falha na região com menor temperatura medida, apenas pela análise do campo de temperaturas, ou ao menos usar essa informação como *priori*. Entretanto, para provar a robustez do método optou-se por não usar esta análise nem como informação *a priori*.

A

Figura 4 apresenta as cadeias de Markov para dois parâmetros, um na região de falha e outro na região de cola (sem falha).

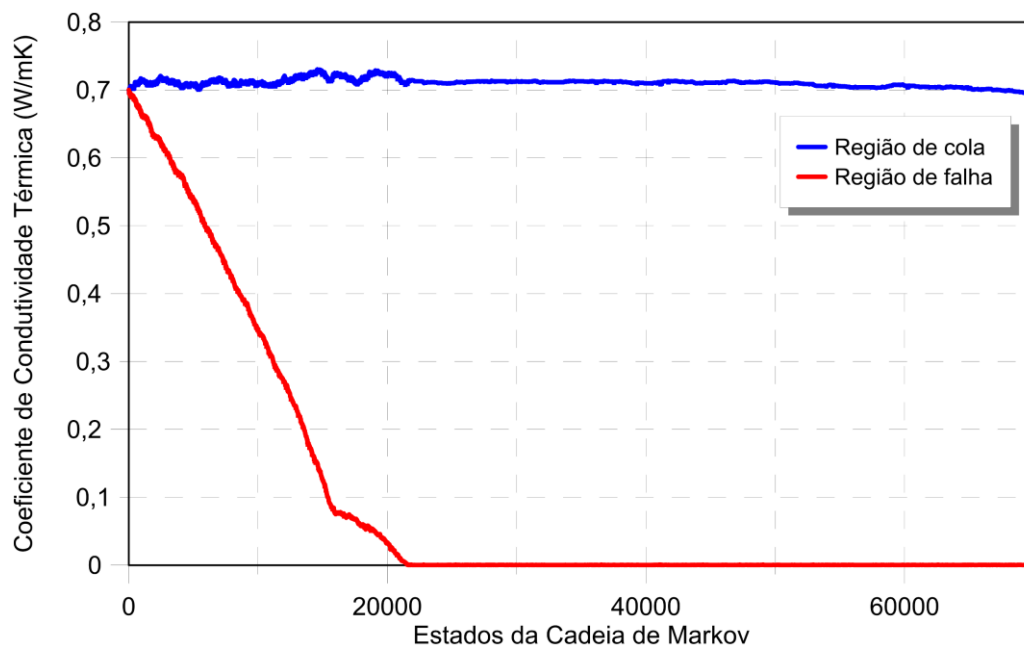


Figura 4. Estados da cadeia de Markov, para o Caso 1.

A

Figura 5 apresenta os histogramas para dois parâmetros, um na região de cola e outro na região de falha, descartando os 20000 estados de aquecimento.

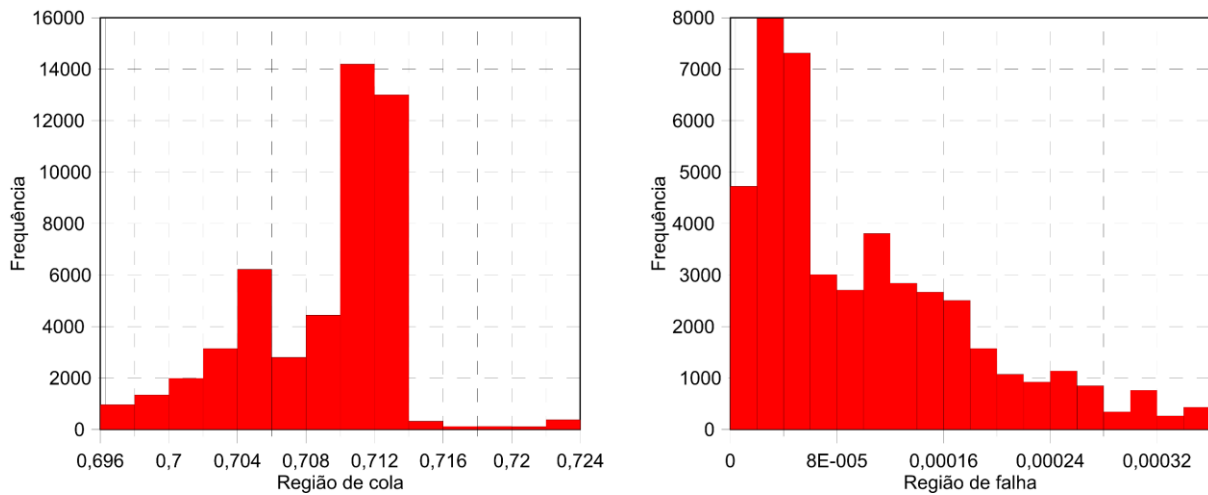


Figura 5. Histogramas para um ponto na região de cola e um na região de falha, para o Caso 1.

O histograma da região de cola apresenta uma característica de uma distribuição Gaussiana, com valor médio próximo a condutividade térmica da cola. Já o histograma da região de falha apresenta característica de uma Gaussiana truncada. Em relação à região de falha, considera-se que a distribuição teve esta característica pois os valores negativos gerados pela distribuição proposta foram descartados, como dito anteriormente, pois fisicamente a condutividade térmica não assume valores negativos. Assim, como a condutividade térmica da região de falha é próxima de zero, para esse caso, a distribuição apresentou tal característica. A taxa de aceitação obtida, no algoritmo de Metropolis-Hasting, foi de aproximadamente 22%.

A Figura 6 apresenta a média da posteriori dos parâmetros discretos estimados da função de condutância térmica, além da função exata.

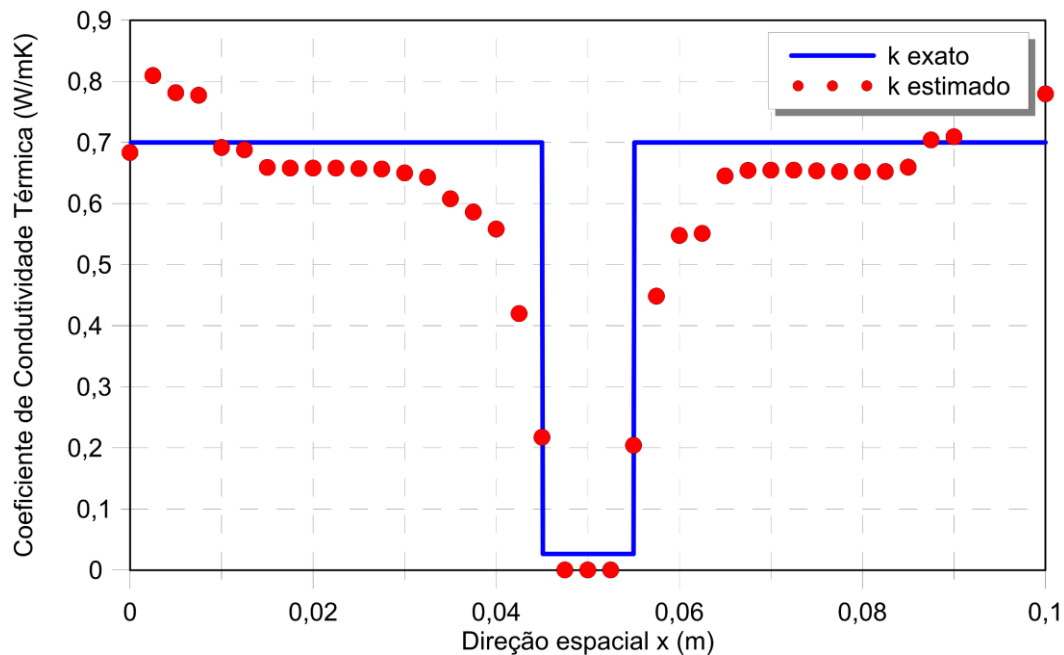


Figura 6. Função exata e estimativa da condutividade térmica, para o Caso 1.

Pode ser observado que os parâmetros longe da região de variação abrupta, do coeficiente de condutividade térmica, apresentaram valores próximos a condutividade real. O resultado apresenta com clareza a região de falha, caracterizada por uma baixa condutividade térmica, comparada a cola utilizada, o que indica a presença de ar.

5.2. Caso 2

O Caso 2 apresenta uma grande diversidade em relação ao caso anterior. O modelo foi formulado com duas regiões de falhas, caracterizadas mais uma vez pela presença de ar, ao invés de cola. Cada falha foi modelada apresentando com um comprimento de 0,01m. Considerou-se uma distância de 0,03m entre as falhas. Apesar da grande mudança física no problema, o modelo matemático utilizado foi mesmo, graças a formulação em Domínio Único utilizada.

Para este caso foram gerados 150000 estados para a cadeia de Markov, sendo considerado como período de aquecimento os 10^5 primeiros estados da cadeia. A utilização de uma quantidade de estados, para a cadeia de Markov, maior que o dobro, se comparada ao caso anterior, mostra o quão difícil foi a recuperação da função de condutividade térmica para este caso. A necessidade de se utilizar uma quantidade tão grande de estados de aquecimento, comparado ao tamanho total da cadeia, ocorre pela função de geração dos candidatos que foi utilizada e principalmente pela restrição de negatividade.

A Figura 7 apresenta as cadeias de Markov para dois parâmetros, um na região de falha e outro na região de cola (sem falha).

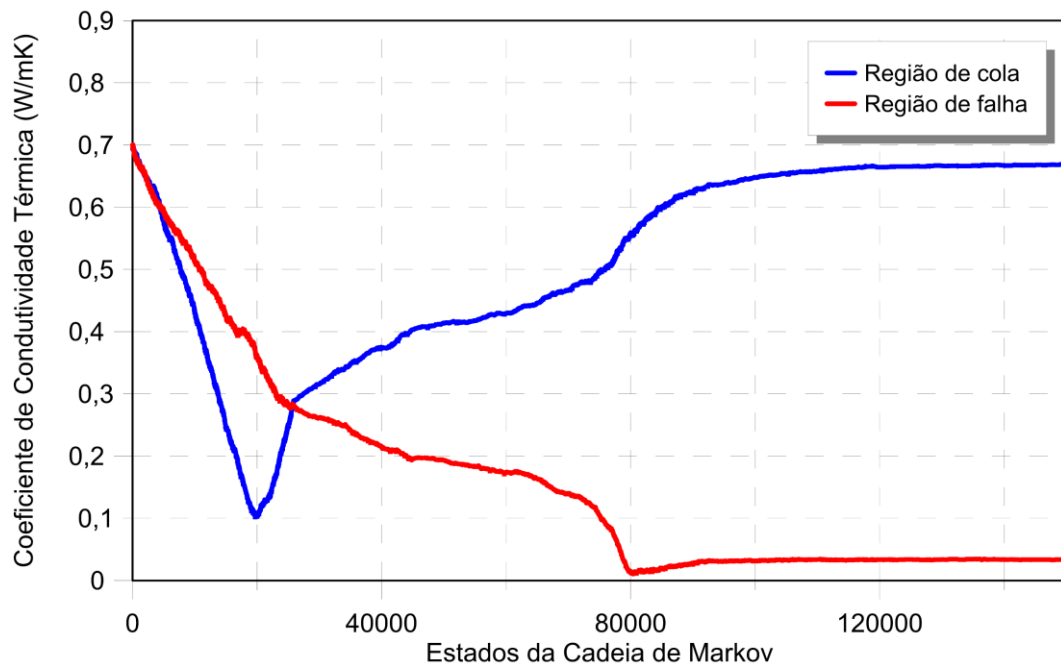


Figura 7. Estados da cadeia de Markov, para o Caso 2.

Diferentemente da figura que apresentava os estados das cadeias de Markov com apenas uma falha, os estados da cadeia para este caso apresentaram comportamento distinto. A condutividade térmica, principalmente da região de cola, apresentou grande variação, o que não ocorreu anteriormente. Além disso, a convergência demorou uma quantidade de estados significativamente para convergir, cerca de 10^5 . Após a convergência, ambos os parâmetros ficaram próximos ao valor real da condutividade térmica do ar e do adesivo utilizado.

A Figura 8 apresenta os histogramas para dois parâmetros, um na região de cola e outro na região de falha, descartando os 10^5 estados de aquecimento. O número elevado de estados de aquecimento foi utilizado, pois as cadeias de Markov, para determinados parâmetros, demoraram mais a convergir, se comparadas aos casos anteriores.

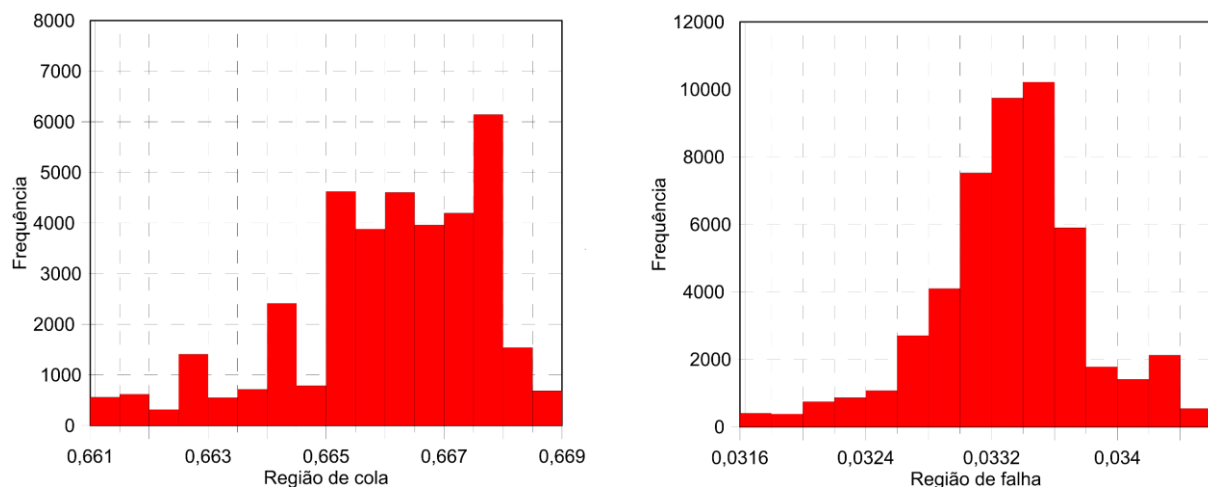


Figura 8. Histogramas para um ponto na região de cola e um na região de falha, para o Caso 2.

Após a convergência, as cadeias apresentaram uma *posteriori* com características similares a de uma distribuição Gaussiana. A taxa de aceitação obtida, no algoritmo de Metropolis-Hasting, foi de aproximadamente 19%.

A Figura 9 apresenta a média da posteriori dos parâmetros discretos estimados da função de condutância térmica, além da função exata.

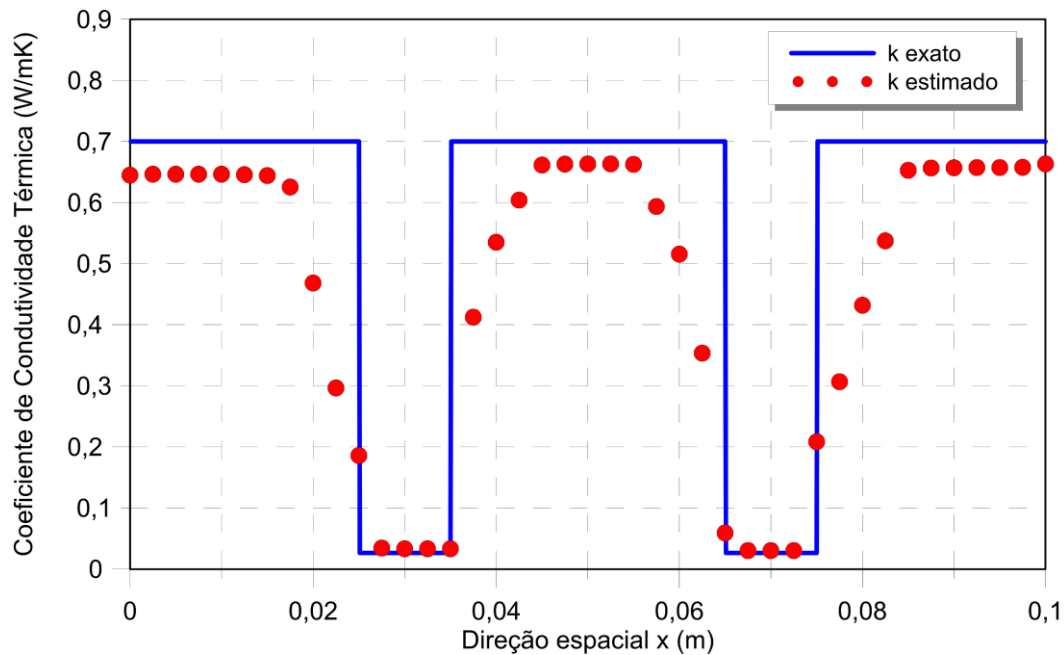


Figura 9. Função exata e estimativa da condutividade térmica, para o Caso 2.

Utilizando uma grande quantidade de estados da cadeia de Markov foi possível recuperar com precisão os parâmetros discretos da condutividade térmica. A figura apresenta com clareza as duas variações abruptas da condutividade térmica, caracterizadas pela existência de falhas por adesão.

6. CONCLUSÃO

O principal objetivo do trabalho foi alcançado. Foi possível identificar a existência de falhas por adesão na junção das camadas do compósito laminado, que são representadas pela ausência de cola e presença de ar. Através da estimativa do coeficiente de condutividade térmica, com variação espacial, pelo Método de Monte Carlo via Cadeias de Markov, foi possível identificar variações abruptas do coeficiente de condutividade térmica, o que caracteriza a existência de uma falha, em vista que a condutividade térmica do ar é significativamente menor do que a da cola utilizada.

7. AGRADECIMENTOS

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

8. REFERÊNCIAS

- Abreu, L.A.S., Alves, C.J.S., Colaço, M.J., and Orlande, H.R.B., 2014b, "A Non-Intrusive Inverse Problem Technique for the Identification of Contact Failures in Double-Layered Composites," Begellhouse, Kyoto, Japan.
- Abreu, L.A.S., Colaço, M.J., Orlande, H.R.B., and Alves, C.J.S., 2016, "Thermography detection of contact failures in double layered materials using the reciprocity functional approach," *Applied Thermal Engineering*, 100, pp. 1173–1178.
- Abreu, L.A.S., Orlande, H.R.B., Kaipio, J., Kolehmainen, V., Cotta, R.M., and Quaresma, J.N.N., 2014a, "Identification of Contact Failures in Multilayered Composites with the Markov Chain Monte Carlo Method," *J. Heat Transfer*, 136(10), pp. 101302–101302.
- Christen, J.A., and Fox, C., 2005, "Markov chain Monte Carlo Using an Approximation," *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 14(4), pp. 795–810.
- Cotta, R.M., Knupp, D.C. and Naveira-Cotta, C.P. "Analytical Heat and Fluid Flow in Microchannels and Microsystems". Springer, 2015b. 164p.
- Grosso, M., Lopez, J.E.C., Silva, V.M.A., Soares, S.D., Rebello, J.M.A., and Pereira, G.R., 2016, "Pulsed thermography inspection of adhesive composite joints: computational simulation model and experimental validation," *Composites Part B: Engineering*, 106, pp. 1–9.

- Grosso, M., Marinho, C.A., Nesteruk, D.A., Rebello, J.M., Soares, S.D., and Vavilov, V.P., 2013, "Evaluating quality of adhesive joints in glass-fiber plastic piping by using active thermal NDT," G.R. Stockton, and F.P. Colbert, eds., Baltimore, Maryland, USA, p. 87050T.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L. e Lavine, A.S., 2007, "Fundamentos de Transferência de Calor e Massa". 6. ed. 644p.
- Kaipio, J., and Somersalo, E., 2005, Statistical and Computational Inverse Problems, Springer-Verlag, New York.
- Knupp, D.C.; Naveira-Cotta, C.P.; Cotta, R.M., 2012, "Theoretical Analysis of Conjugated Heat Transfer with a Single Domain Formulation and Integral Transforms", International Communications in Heat and Mass Transfer.
- Knupp, D.C., Mascouto, S.M., Abreu, L.A.S, Sanches, E.L. and Sphaier, L.A., 2017, "Heat conduction analysis in layered media with adhesive defect via single domain formulation, integral transforms and finite difference", International Communications in Heat and Mass Transfer.
- Mikhailov, M.D. e Özisik, M.N., 1984, "Unified Analysis and Solutions of Heat and Mass Difusion".
- Meola, C. and Carlomagno, G.M., 2004, "Recent advances in the use of infrared thermography". Measurement Science and Technology, v. 15, n. 9. ISSN 0957-0233.
- Orlande, H. R. B., 2012, "Inverse Problems in Heat Transfer: New Trends on Solution Methodologies and Applications," Journal of Heat Transfer, 134(3), p. 031011.
- Orlande, H.R.B., Dulikravich, G.S., Neumayer, M., Watzonig, D., and Colaço, M.J., 2014, "Accelerated Bayesian Inference for the Estimation of Spatially Varying Heat Flux in a Heat Conduction Problem," Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 65(1), pp. 1–25.
- Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow". 1.ed.

9. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

FAILURES IDENTIFICATION IN LAMINATED COMPOSITES THROUGH HEAT CONDUCTION ANALYSIS WITH INTEGRAL TRANSFORMS AND SINGLE DOMAIN

Fabricio da Silva Mascouto, mascouto@iprj.uerj.br¹
Luiz Alberto da Silva Abreu, luiz.abreu@iprj.uerj.br¹
Diego Campos Knupp, diegoknupp@iprj.uerj.br¹
Emerson de Lima Sanches, esanches@iprj.uerj.br¹
Leandro Alcoforado Sphaier, lasphaier@id.uff.br²

¹Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Rua Bonfim, 25, Vila Amélia, Nova Friburgo, RJ

²Universidade Federal Fluminense - Rua Passo da Pátria, 156, Boa Viagem, Niterói, RJ

Abstract. *This paper deals with failures identification in the junction region of a laminated composite, in which occurs the transition and the adhesion of two different matrices of the analyzed set. The direct problem solution deals with a hybrid methodology, where the direct problem, formulated in a single domain, is solved by the Classical Integral Transform Technique, which generates an eigenvalue problem, being in turn solved by the Finite Difference Method. The failures identification is obtained by the estimation of the thermal conductivity coefficient throughout the region that should have adhesive, using the formulation and the solution of an inverse problem. The Bayesian Inference with Total Variation prior information was used in the present study. The failures are characterized by the absence of adhesive, and in its place there is air, which in turn has a much smaller thermal conductivity coefficient than the adhesive. Thus, in the presence of failures, there is an abrupt variation of the coefficient along the adhesive region. The results obtained with simulated measurements demonstrate that the method is able to identify faults.*

Keywords: Heat Transfer, Failures Identification, Single Domain, Bayesian Inference, Total Variation.