

CONSTRUCTAL DESIGN DE CAMINHOS NÃO-UNIFORME DE ALTA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM FORMA DE “Y” PARA A REFRIGERAÇÃO DE CORPOS GERADORES DE CALOR

Beckel, Cássia C., cassia.beckel@ufrgs.br¹

Santos, Cristina H., crishorbach@gmail.com¹

Isoldi, Liércio A., liercioisoldi@furg.br²

Dos Santos, Elizaldo D., elizaldosantos@furg.br²

Rocha, Luiz A. O., luizrocha@mecanica.ufrgs.br³

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rua Sarmento Leite – 425, Porto Alegre, 90050-170, Brazil

² Universidade Federal do Rio Grande, Escola de Engenharia, Av. Itália Km 8, Rio Grande, 96201-900, Brazil

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Sarmento Leite – 425, Porto Alegre, 90050-170, Brazil

Resumo: Este estudo numérico utiliza o método Constructal Design para reduzir os pontos quentes de um sólido com geração de calor uniforme por unidade de volume através da transferência de calor por condução. A ideia é facilitar o acesso do fluxo de calor através de uma via em forma de “Y” empregando condutividades térmicas não-uniformes para a base e ramos do Y. A função objetivo consiste em minimizar o excesso de temperatura máxima adimensional de todo o sistema (materiais de alta e de baixa condutividade térmica). A configuração do sistema pode variar sujeita a duas restrições: o volume total e o volume das vias de alta condutividade. Materiais de várias condutividades e frações de áreas são estudados. Os resultados mostram a aplicabilidade do Constructal Design para a melhoria do desempenho térmico do sistema. Utilizando condutividades diferentes para a base e os ramos obteve-se uma melhora de mais de 30%. A geometria otimizada é aquela que melhor distribui as imperfeições, isto é, os pontos quentes (pontos de temperatura máxima), o que está de acordo com o princípio da ótima distribuição das imperfeições.

Palavras-chave: Constructal design, condução de calor, caminhos condutivos em forma de “Y”, material de alta condutividade

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento acelerado da tecnologia e da indústria moderna, a importância em aperfeiçoar as técnicas de transferência de calor tornou-se mais notável do que em qualquer momento. O desempenho global do sistema é significativamente afetado com a refrigeração dos dispositivos eletrônicos, assim como pela própria segurança do sistema. Os estudos no campo de resfriamento de dispositivos eletrônicos tornou-se uma tecnologia essencial na evolução de miniaturizados de alto desempenho. Os dados estatísticos mostram que 55% dos dispositivos reais falham por causa da elevada temperatura e esta porcentagem aumenta exponencialmente com o aumento da temperatura (Qi *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2005). A diversidade de parâmetros tanto geométricos, como físicos, relacionados ao tipo de material que compõe os trocadores de calor tem sido cada vez mais estudada. Problemas de transferência de calor, cujo objetivo é minimizar a resistência térmica global em um determinado volume finito, considerando o calor gerado em cada ponto, têm sido amplamente estudados na literatura (Bejan, 2000; Boichot *et al.*, 2009).

O método convencional de resfriamento por convecção, muitas vezes utilizado para controlar a temperatura de um sistema, pode tornar-se inviável porque os canais de transferência de calor ocupam muito espaço. Por isso, é necessário construir estruturas de condução de calor com materiais de elevada condutividade ligados ao ambiente externo que atuará como um sumidouro de calor (Bejan, 1996a; Bejan, 2000).

Dan e Bejan (1998) estudaram o problema da condução de calor relacionado com dois materiais em uma montagem. Os resultados confirmaram as vantagens da estrutura em forma de árvore. Eles concluíram que o tempo para arrefecimento por condução de um volume pode ser minimizado fazendo alterações apropriadas na forma exterior do volume, de modo que o tempo de arrefecimento seja mínimo e que seja distribuída otimamente uma quantidade finita de material de alta condutividade através do volume, a fim de facilitar a retirada de calor pelo dissipador.

Estudos para projetar a estrutura de condução de calor ideal têm atraído muita atenção e muitos avanços foram obtidos (Shengbin *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2011), incluindo modelos matemáticos e os métodos de solução

correspondentes. Cheng *et al.* (2002) e Han *et al.* (2006) propuseram alguns critérios de design prático e desenvolveram a otimização de estruturas de condução de calor baseados em duas funções objetivos: dissipação da capacidade potencial de transporte de calor e da geração de entropia. Bejan (1996b), Rocha *et al.* (2006) e Horbach *et al.* (2014) apresentaram estruturas em forma de uma “árvore” como método de construção de redes baseada na teoria constructal. Nessa mesma direção, o presente trabalho utiliza o método Constructal Design para desenvolver um estudo numérico da configuração de caminhos de alta condutividade térmica em forma de “Y” que minimiza a resistência ao fluxo de calor quando as áreas ocupadas pelos materiais de alta e baixa condutividade são mantidas constantes.

2. MODELO MATEMÁTICO

Considere o corpo condutor mostrado na Fig. 1. A configuração é bidimensional, com a terceira dimensão (W) suficientemente longa em comparação com a altura (H) e o comprimento (L) do volume total. Existem vias em forma de “Y” de um material com condutividade térmica elevada k_{p0} na base e k_{p1} nos ramos, inseridas no corpo com menor condutividade térmica (k). O corpo sólido gera calor uniformemente a taxa volumétrica q''' (W/m^3). As superfícies exteriores do corpo são perfeitamente isoladas. A corrente de calor gerada ($q'''AW$) é removida pelos dissipadores de calor localizados na borda do corpo à temperatura T_0 .

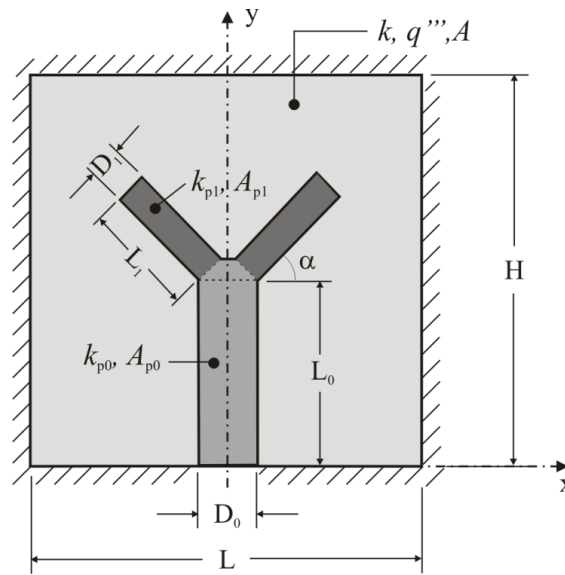


Figura 1. Áreas do domínio com diferentes valores de condutividade térmica e principais dimensões para o corpo altamente condutivo a ser analisado.

O presente trabalho consiste em calcular o excesso da temperatura adimensional máxima $(T_{\max} - T_0)/(q'''A/k)$ e observar o que a geometria (L_1/L_0 , α , D_1/D_0 e $\tilde{D}_0$) facilita a remoção do calor. De acordo com a visão do constructal design, a busca pode ser submetida a duas restrições de área. A restrição da área total,

$$A = HL \quad (1)$$

e a restrição da área ocupada pelos materiais de alta condutividade,

$$A_p = A_{p0} + A_{p1} \quad (2)$$

Sendo que:

$$A_{p0} = L_0 D_0 + \left(\frac{D_0 + (D_0 - 2X)}{2} \right) Y \quad (3)$$

$$A_{p1} = 2L_1 D_1 \quad (4)$$

com

$$X = D_1 \cos \beta, \quad Y = D_1 \sin \beta \quad (5)$$

Sendo,

$$\beta = \pi - \left(\frac{\pi}{2} + \alpha \right) \quad (6)$$

As frações de área, ϕ_0 e ϕ_1 , podem ser expressas, respectivamente, por:

$$\phi_1 = \frac{A_{p1}}{A} \quad (7)$$

$$\phi_0 = \frac{A_{p0}}{A} \quad (8)$$

A análise que proporciona o excesso de temperatura máxima em função da geometria consiste em resolver numericamente a equação de condução com geração de calor constante ao longo da região de menor condutividade térmica k (região branca da Fig. 1):

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tilde{y}^2} + 1 = 0 \quad (9)$$

e a condução de calor constante, sem geração de calor na região de alta condutividade térmica (região cinza da Fig. 1):

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tilde{y}^2} = 0 \quad (10)$$

As outras superfícies são isoladas e suas condições de contorno são:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tilde{n}} = 0 \quad (11)$$

Para a região em contato com o dissipador de calor ($-\tilde{D}_0/2 \leq \tilde{x} \leq \tilde{D}_0/2; \tilde{y} = 0$), a condição de contorno é dada por uma temperatura constante:

$$\theta_0 = 0 \quad (12)$$

As formas adimensionais das Eqs. (3) e (4) são, respectivamente:

$$\phi_0 = \frac{\phi_1}{2 \left(\frac{\tilde{L}_1}{\tilde{L}_0} \right) \left(\frac{\tilde{D}_1}{\tilde{D}_0} \right)} + \tilde{D}_0 \tilde{Y} - \tilde{X} \tilde{Y} \quad (13)$$

$$\phi_1 = 2 \tilde{L}_1 \tilde{D}_1 \quad (14)$$

O excesso de temperatura máxima adimensional ($\theta_{\max}$), é definido como:

$$\theta_{\max} = \frac{T_{\max} - T_0}{q''' A/k} \quad (15)$$

Com o problema totalmente formulado e a geometria definida, a resistência térmica pode ser calculada com os parâmetros estabelecidos, variando os graus de liberdade determinados para o problema.

3. MODELO NUMÉRICO

O método numérico foi inicialmente desenvolvido para uma configuração inicial com a forma de “Y” onde o valor de $k_{p0} = k_{p1}$. A função definida pela Eq. (15) pode ser determinada pela solução numérica da condução do calor dada pelas Eqs. (9) e (10) para o campo de temperatura em cada configuração assumida, dependendo do grau de liberdade fixado. A malha apropriada foi determinada por refinamentos sucessivos, aumentando o número de elementos até que o critério $|(\theta_{\max}^j - \theta_{\max}^{j+1})/\theta_{\max}^j| < 1,0 \times 10^{-4}$ seja satisfeito, onde $\theta_{\max}^j$ representa o excesso de temperatura máxima adimensional calculado utilizando o tamanho de malha atual, e $\theta_{\max}^{j+1}$ corresponde ao excesso de temperatura máxima usando a malha seguinte, onde o número de elementos foi aumentado em quatro vezes. Para determinar a solução numérica das equações de condução do calor é utilizado um código de elementos finitos, com base em elementos triangulares, desenvolvido em ambiente MATLAB (2000), mais precisamente a ferramenta PDE (equações diferenciais

parciais). A Tabela 1 apresenta a independência de malha realizada considerando $k_{p0} = k_{p1}$. Os seguintes resultados foram obtidos usando um intervalo entre 2.100 e 560.000 elementos triangulares, gerando uma malha não uniforme.

Tabela 1. Testes para encontrar os resultados numéricos independentes do número de elementos da malha com $\phi = 0,2$, $H/L = 1,0$, $\tilde{D}_0 = 0,7$, $L_1/L_0 = 143$, $D_1/D_0 = 0,14$, $\tilde{k}_p = 300$ e $\alpha = 89^\circ$.

Número de elementos	$\theta_{\max}^i$	$ (\theta_{\max}^i - \theta_{\max}^{i+1})/\theta_{\max}^i $
2.166	0,041082	$3,1803 \times 10^{-3}$
8.664	0,041213	$9,4072 \times 10^{-4}$
34.656	0,041252	$2,6554 \times 10^{-4}$
138.624*	0,041263	$7,3607 \times 10^{-5}$
554.496	0,041266	-

* malha independente

A malha considerada ideal para o problema proposto é composta por 138.624 elementos triangulares, que representam três refinamentos consecutivos, sendo a mesma adotada para todos os casos estudados. A validação do método numérico é mostrada com detalhes por Horbach et al (2014).

4. RESULTADOS

No presente estudo é realizada a análise de uma configuração para o material de alta condutividade em “Y”, onde a condutividade térmica da base, $\tilde{k}_{p0}$, é diferente da condutividade térmica dos ramos, $\tilde{k}_{p1}$, conforme mostrado na Fig. 1. Inicialmente, buscou-se descobrir qual a melhor combinação de valores das condutividades e se o melhor seria uma maior condutividade na base ou nos ramos da geometria. Para tanto foram testados quatro combinações e as curvas de excesso de temperatura em função do grau de liberdade L_1/L_0 estão representadas na Fig. 2.

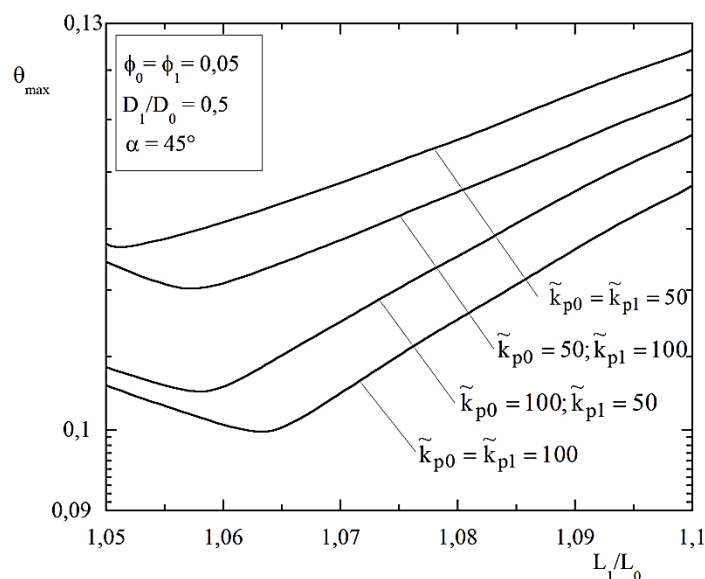


Figura 2. Comportamento da resistência térmica em função do parâmetro L_1/L_0 para diferentes pares de condutividade térmica.

Como poderia ser previsto, o melhor desempenho foi obtido quando a base e os ramos possuíam o material melhor condutor. Porém o resultado quando as condutividades adimensionais são $\tilde{k}_{p0} = 100$ e $\tilde{k}_{p1} = 50$, diferem em apenas 5,4% ao se comparar com os resultados para o par de condutividades $\tilde{k}_{p0} = \tilde{k}_{p1} = 100$ (caso em que ocorre o melhor desempenho), podendo justificar o uso de uma condutividade menor nos ramos.

Quando comparados os resultados para resistência térmica mínima obtida quando os pares de condutividades são $\tilde{k}_{p0} = 50$ e $\tilde{k}_{p1} = 100$ com os resultados quando $\tilde{k}_{p0} = \tilde{k}_{p1} = 50$, as diferenças são de 6,2%. Por fim, a melhor escolha é o par cuja menor condutividade térmica é posta nos ramos, ou seja, nesta análise, quando as frações de área são iguais, a parte da geometria que apresenta maior significância na troca térmica é a parte da base. Para o caso de $\tilde{k}_{p0} = 50$ e $\tilde{k}_{p1} = 100$ comparado com o de $\tilde{k}_{p0} = 100$ e $\tilde{k}_{p1} = 50$ este último tem 14,3% melhor desempenho térmico. Estes resultados mostram que a geometria se adapta ao tipo de condutividade imposta, ou seja, a capacidade de

fluxo que é permitida ao sistema. Na Fig. 3, é avaliado o comportamento de três pares diferentes para os valores da condutividade térmica em função da fração de área ϕ_0 .

Pode-se perceber na Fig. 3 que a diferença entre o melhor desempenho, quando $\tilde{k}_{p0} = 300$ e $\tilde{k}_{p1} = 50$ e o pior desempenho, quando $\tilde{k}_{p0} = 100$ e $\tilde{k}_{p1} = 50$, é de 14,8%. Se comparada a combinação de $\tilde{k}_{p0} = 300$ e $\tilde{k}_{p1} = 50$ com a combinação de $\tilde{k}_{p0} = 200$ e $\tilde{k}_{p1} = 50$ essa diferença é de apenas 3,5%. Para as três combinações os resultados de menor resistência térmica foram gerados quando $\phi_0 = \phi_1 = 0,05$, ou seja, proporções equivalentes para ambas as partes, base e ramos da geometria. A Fig. 4 mostra que o ângulo ótimo que resulta na menor resistência térmica ocorre em torno de $\alpha = 50^\circ$, sendo que a variação do ângulo não resultou grandes variações no desempenho térmico do sistema, entre 40° e 60° os resultados apresentam variações de apenas 0,3%. A Fig. 4 representa também os respectivos valores ótimos para L_1/L_0 onde é observado uma sensível redução da razão $(L_1/L_0)_o$ com o aumento de α para $\alpha \geq 50^\circ$.

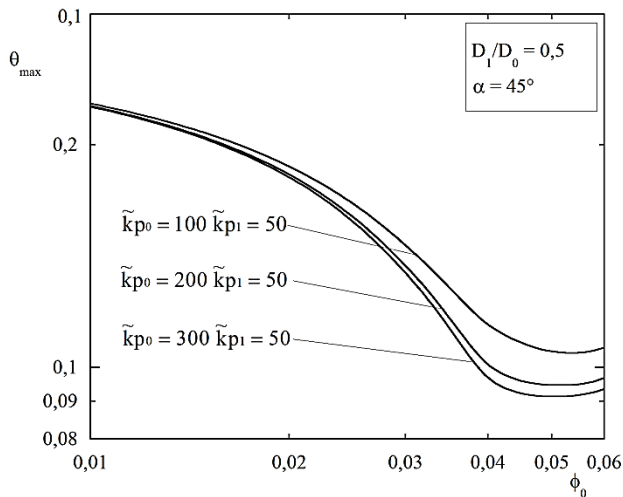


Figura 3. Comportamento da resistência térmica em função do parâmetro ϕ_0 para diferentes pares de condutividade térmica.

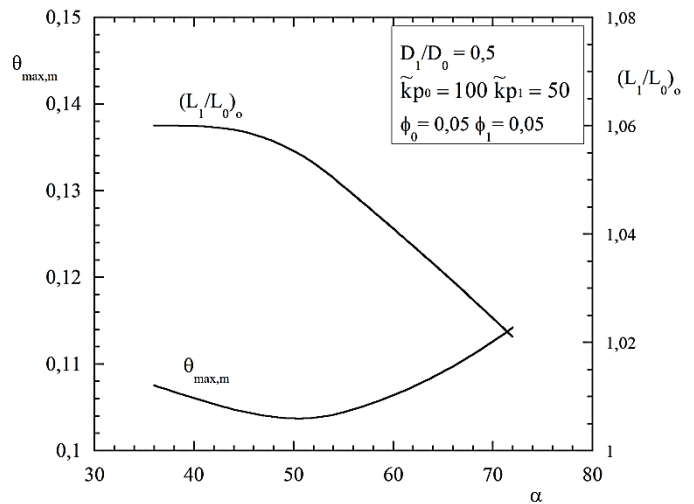


Figura 4. Comportamento da resistência térmica e do parâmetro L_1/L_0 uma vez otimizados em função do ângulo α .

A Figura 5 ilustra a configuração de melhor desempenho encontrada a partir da análise mostrada na Fig. 4. Pode ser visto que há uma distribuição bastante homogênea do campo de temperaturas com cinco pontos de máxima temperatura: nos cantos do domínio sólido e um ponto entre os ramos bifurcados do Y.

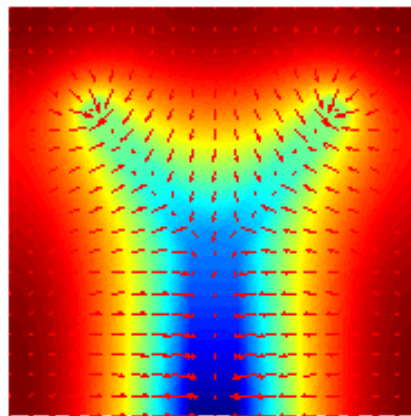


Figura 5. Melhor geometria encontrada na Fig. 4 para $(L_1/L_0)_{oo} = 1,05$, $\alpha_o = 51,4^\circ$, $D_1/D_0 = 0,5$ e $\theta_{max,min} = 0,1036$.

A Fig. 6 mostra a resistência térmica das geometrias geradas para várias combinações dos parâmetros ϕ_0 e ϕ_1 . Os resultados obtidos demonstram que o pior desempenho é obtido quando $\phi_1 = 0,09$ e $\phi_0 = 0,01$ e que se utilizado o ângulo ótimo e uma combinação de $\phi_0 \ll \phi_1$ com uma pequena perda no desempenho, ocasiona uma economia de material de alta condutividade. Novamente em função do ângulo α é mostrado na Fig. 7 o comportamento do parâmetro $(L_1/L_0)_{oo}$ correspondente aos resultados da Fig. 6 para diferentes pares de frações de área.

A Fig. 7 mostra que a razão $(L_1/L_0)_{oo}$ é quase independente de α quando o valor de ϕ_1 é menor ou igual a 0,07. Pode-se dizer que para todos os pares de frações analisadas, o valor de $(L_1/L_0)_{oo}$ apresenta variação irrelevante para

ângulos maiores que 60° e que quando ϕ_0 menor que 0,07 as variações são insignificantes para todos os ângulos testados.

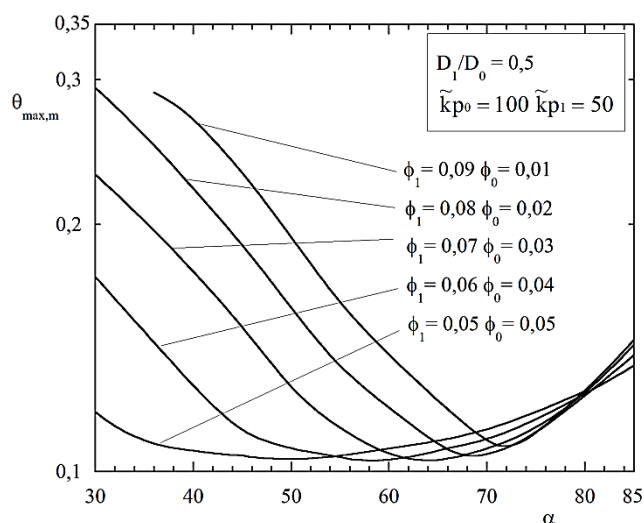


Figura 6. Comportamento da resistência térmica otimizada em função do ângulo α para diferentes combinações das frações de ϕ_0 e ϕ_1 quando $\tilde{k}_{p0} = 100$ e $\tilde{k}_{p1} = 50$.

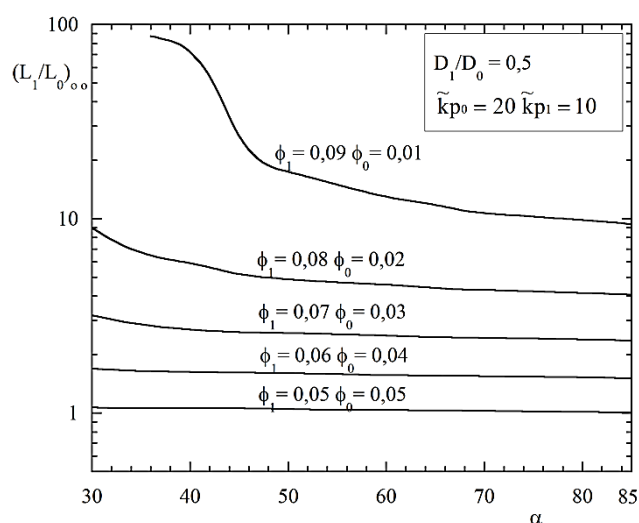


Figura 7. Razão $(L_1/L_0)_{oo}$ correspondente aos valores da Fig. 6 em função do ângulo α para diferentes combinações das frações de área ϕ_0 e ϕ_1 .

As melhores configurações encontradas nessa etapa da otimização encontram-se na Fig. 8, sendo a melhor combinação o par $\phi_0 = 0,03$ e $\phi_1 = 0,07$ obtendo $\theta_{max,min} = 0,1023$.

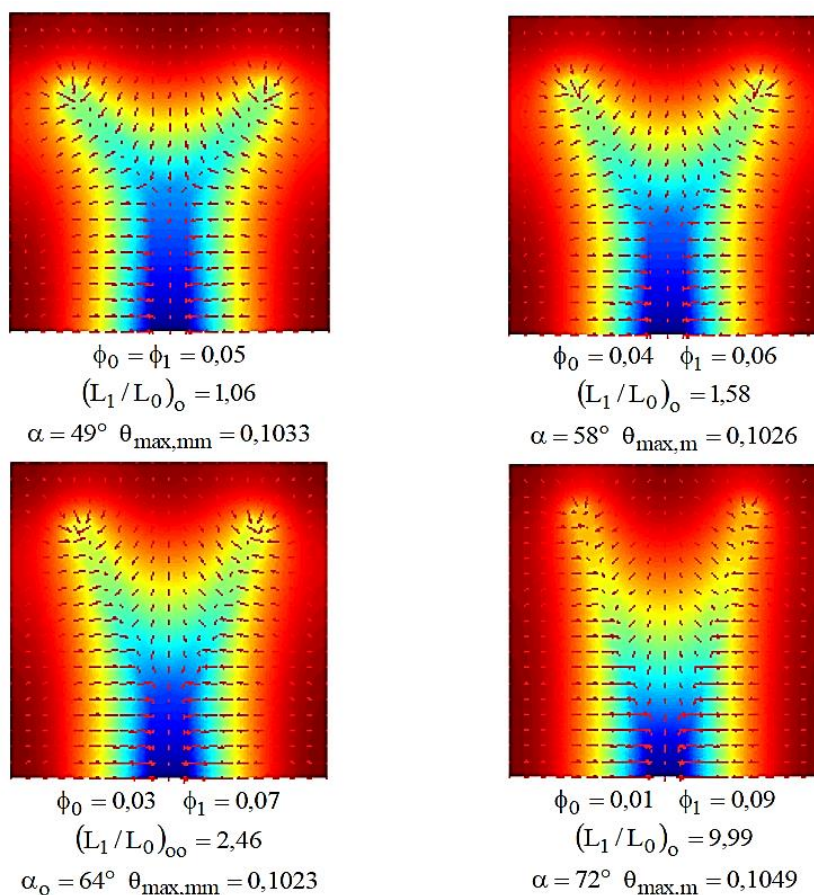


Figura 8. Representação de algumas configurações encontradas na Fig. 6.

Para o par de condutividades térmicas adimensional, $\tilde{k}_{p0} = 20$ e $\tilde{k}_{p1} = 10$, a Fig. 9 e a Fig. 10 demonstram o comportamento do parâmetro $(L_1/L_0)_o$ e da resistência térmica em função do ângulo α . Na Fig. 10 observa-se que quando as frações de área são $\phi_0 = \phi_1 = 0,05$ e o ângulo α em torno de 50° se tem o melhor desempenho térmico.

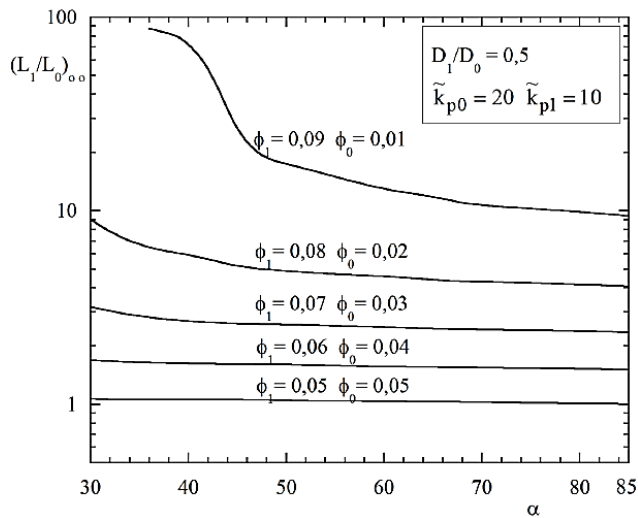


Figura 9. Comportamento do parâmetro $(L_1/L_0)_o$ em função do ângulo α para diferentes combinações das frações de ϕ_0 e ϕ_1 quando $\tilde{k}_{p0} = 20$ e $\tilde{k}_{p1} = 10$.

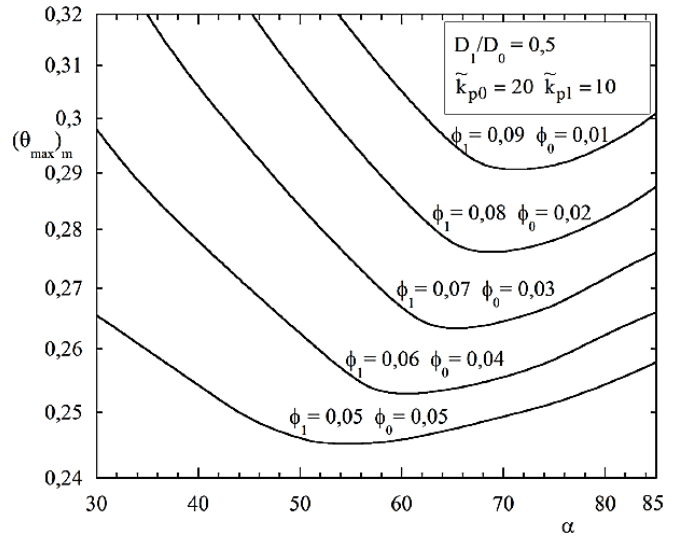


Figura 10. Comportamento da resistência térmica otimizada em função do ângulo α para diferentes combinações das frações de área ϕ_0 e ϕ_1 quando $\tilde{k}_{p0} = 20$ e $\tilde{k}_{p1} = 10$.

A Fig. 11 demonstra as curvas de melhor desempenho para diferentes valores do parâmetro D_1/D_0 para três combinações de condutividade térmica. Para cada par escolhido, os parâmetros ϕ_0 , ϕ_1 , α e L_1/L_0 apresentam valores ótimos distintos. No entanto, os melhores desempenhos são obtidos quando $D_1/D_0 = 0,5$ para todos os três casos avaliados. Nota-se que quando o par $\tilde{k}_{p0} = 20$, $\tilde{k}_{p1} = 10$ aumenta para $\tilde{k}_{p0} = 100$, $\tilde{k}_{p1} = 50$ há um decréscimo de 58% na resistência térmica. Entretanto, quando o par $\tilde{k}_{p0} = 100$, $\tilde{k}_{p1} = 50$ aumenta para $\tilde{k}_{p0} = 200$, $\tilde{k}_{p1} = 50$ a resistência térmica diminui somente 8%. As melhores configurações encontradas nessa etapa da otimização encontram-se na Fig. 12.

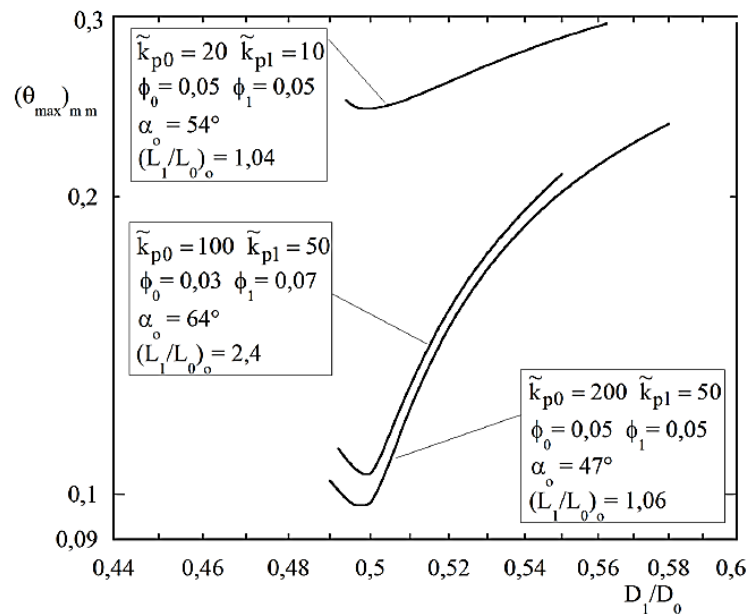


Figura 11. Comportamento da resistência térmica duas vezes otimizada em função do parâmetro D_1/D_0 para diferentes valores de condutividade, frações de área e ângulo α , conforme as legendas representadas no gráfico.

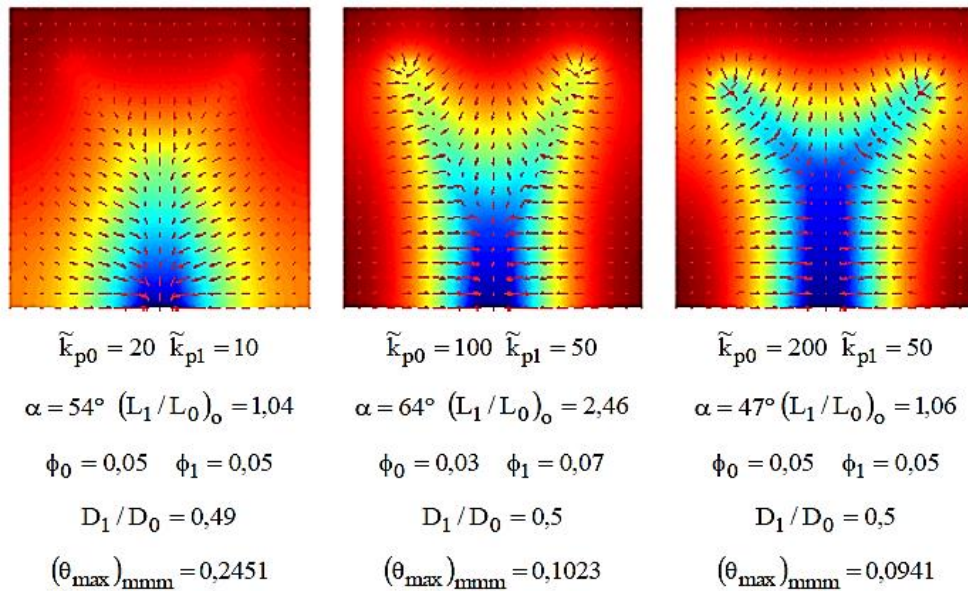


Figura 12. Representação de algumas configurações encontradas na Fig. 11.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho aplica o método constructal design para obter a arquitetura que minimiza o desempenho de vias condutoras em forma de “Y” de um material de alta condutividade incorporado no corpo de menor condutividade que gera calor uniformemente a uma taxa volumétrica. O resfriamento do sistema dá-se a partir do contato do material de alta condutividade em uma região das bordas que é mantida à temperatura constante. As superfícies exteriores do sólido são perfeitamente isoladas. Considerou-se uma condutividade térmica diferente da área em “Y”, de modo que a base do “Y” tivesse um valor de condutividade térmica $\tilde{k}_{p0}$ e os ramos uma condutividade térmica de valor $\tilde{k}_{p1}$. Dessa forma, foi possível estudar qual região seria predominante na troca térmica, ocasionando assim economia na escolha dos materiais.

Considerando as quatro combinações avaliadas concluiu-se que o par $\tilde{k}_{p0} = 100$ e $\tilde{k}_{p1} = 50$ representa uma escolha com bom retorno na troca térmica, pois o desempenho do sistema cai apenas 5,36% ao substituir $\tilde{k}_{p1} = 100$ por $\tilde{k}_{p1} = 50$, para o caso onde a base e os ramos da geometria têm a mesma quantidade de material $\phi_0 = \phi_1 = 0,05$. A proposta de utilizar um material menos nobre na base da geometria foi avaliada para diferentes combinações da fração de área total do condutor, onde ϕ_0 e ϕ_1 receberam valores diferentes que resultassem em $\phi_0 + \phi_1 = 0,1$. O melhor desempenho ocorreu no caso em que os materiais foram igualmente distribuídos, com $\phi_0 = \phi_1 = 0,05$ e a combinação de $\tilde{k}_{p0} = 200$ e $\tilde{k}_{p1} = 50$ pode ser escolhida à frente de $\tilde{k}_{p0} = 300$ e $\tilde{k}_{p1} = 50$ com um prejuízo de apenas 3,5% no desempenho térmico.

Para a análise com $\tilde{k}_{p0} = 100$ e $\tilde{k}_{p1} = 50$, mantido fixo $D_1/D_0 = 0,5$ a fração de área correspondente à base deve ser próxima de 30% de material nobre, $\phi_0 = 0,03$, para um melhor rendimento térmico e ângulo $\alpha = 64^\circ$. No entanto para a combinação de condutividades $\tilde{k}_{p0} = 20$ e $\tilde{k}_{p1} = 10$ e para a combinação $\tilde{k}_{p0} = 200$ e $\tilde{k}_{p1} = 50$, a distribuição de material igual para a base e os ramos do Y, com $\phi_0 = \phi_1 = 0,05$, e o ângulo α fica em torno de 50° , apresentam os melhores resultados. Quando as condutividades $\tilde{k}_{p0} = 20, \tilde{k}_{p1} = 10$ aumentam para $\tilde{k}_{p0} = 100, \tilde{k}_{p1} = 50$ há um decréscimo próximo de 60% na resistência térmica. Entretanto, quando o par $\tilde{k}_{p0} = 100, \tilde{k}_{p1} = 50$ aumenta para $\tilde{k}_{p0} = 200, \tilde{k}_{p1} = 50$ a resistência térmica decresce somente 8%.

O parâmetro D_1/D_0 foi otimizado para três combinações de condutividade térmica e para cada par escolhido, os parâmetros ϕ_0, ϕ_1, α e L_1/L_0 apresentaram valores ótimos distintos. No entanto, os melhores desempenhos são conseguidos quando $D_1/D_0 = 0,5$ para todos os três casos avaliados. O ângulo α e o parâmetro L_1/L_0 não apresentaram grandes variações para diferentes frações de área ϕ_0 avaliadas. Os valores ótimos encontrados foram $(\theta_{\max})_{\text{mm}} = 0,1023$ quando $\tilde{k}_{p0} = 100$ e $\tilde{k}_{p1} = 50$, $(\theta_{\max})_{\text{mm}} = 0,0941$ quando $\tilde{k}_{p0} = 200$ e $\tilde{k}_{p1} = 50$. Quando comparados o desempenho do caso inicial do “Y” com condutividades $\tilde{k}_{p0} = 100$ e $\tilde{k}_{p1} = 50$, exibidos na Fig. 2 onde se obteve $(\theta_{\max})_{\text{mm}} = 0,147$ quando $L_1/L_0 = 1,1$ com o caso mostrado na Fig. 11, onde se obteve $(\theta_{\max})_{\text{mm}} = 0,1023$ quando $(L_1/L_0)_{oo} = 2,46$, se percebe uma melhora superior a 30% na troca térmica. O valor otimizado de L_1/L_0 finito com ordem de magnitude 1, indica que a configuração otimizada tem a forma de “Y” e demonstra a influência da condutividade térmica sobre a geometria ótima.

Finalmente, este trabalho mostrou que a geometria otimizada é aquela que melhor distribui as imperfeições, isto é, os pontos quentes (pontos de temperatura máxima) o que está de acordo com o princípio constructal da ótima distribuição das imperfeições.

6. AGRADECIMENTOS

L.A.O. Rocha e C. C. Beckel agradecem o suporte financeiro do CNPq, Brasília, DF.

7. REFERÊNCIAS

- Bejan, A., 1996a, “Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 799–816.
- Bejan, A., 1996b, “Street network theory of organization in nature”, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 30(2), pp. 85-107.
- Bejan, A., 2000, *Shape and Structure, from Engineering to Nature*, Ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Boichot, R., Luo, L. and Fan Y., 2009, “Tree-network structure generation for heat conduction by cellular automaton”, *Journal Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp. 376–386.
- Cheng, X. G., Xia, Z. and Li, Z. X., 2002, “Optimization of heat conduction: Thermal dissipation and optimal thermal conductivity distribution”, *Journal of Engineering Thermophysics*, Vol. 23, pp. 715-717.
- Dan, N. and Bejan, A., 1998, “Constructal tree networks for the time-dependent discharge of finite-size volume to one point”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 84(6), pp. 3042-3050.
- Han, G. Z. and Guo, Z. Y., 2006, “Two different thermal optimization objective functions: Dissipation of heat transport potential capacity and entropy production”, *Journal of Engineering Thermophysics*, Vol. 27, pp. 811-813.
- Horbach, C.S., Dos Santos, E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2014, “Constructal design of Y-shaped pathways for cooling a heat-generating body”, *Defect and Diffusion Forum*, Vol. 348, pp. 245-260.
- Liu, M. A., Dong, Q. X. and Chen, S., 2005, “Investigation on thermal design for opening cabinet of electronic equipment by numerical simulation”, *Journal of air force engineering university*, Vol. 6, p. 62-65.
- MATLAB, 2000. *User's Guide*, Version 6.0.088, Release 12, The Mathworks Inc.
- Qi, Y. Q., He, Y. L. and Zhang, W., 2003, “Thermal analysis and design of electronic equipments”, *Modern Electronic Technology*, Vol. 144, pp. 73-76.
- Rocha, L. A. O., Lorente, S. and Bejan, A., 2006, “Conduction tree networks with loops for cooling a heat generating volume”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 2626-2635.
- Shengbin, Z., Lingen, C. and Fengrui, Sun., 2007, “Optimization of constructal volume-point conduction with variable cross section conducting path”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, pp. 106-111.
- Zhang, Y., Liu, S. and Qiao, H., 2011, “Design of the heat conduction structure based on the topology optimization”, *Developments in Heat Transfer*, Vol. 26, pp. 523-536.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

CONSTRUCTAL DESIGN OF NON-UNIFORM HIGH CONDUCTIVITY Y-SHAPED PATHWAYS FOR COOLING HEAT GENERATING BODIES

Beckel, Cássia C., cassia.beckel@ufrgs.br¹

Santos, Cristina H., crishorbach@gmail.com¹

Isoldi, Liércio A., liercioisoldi@furg.br²

Dos Santos, Elizaldo D., elizaldosantos@furg.br²

Rocha, Luiz A. O., luizrocha@mecanica.ufrgs.br³

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rua Sarmento Leite – 425, Porto Alegre, 90.050-170, Brazil

² Universidade Federal do Rio Grande, Escola de Engenharia, Av. Itália Km 8, Rio Grande, 96201-900, Brazil

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Sarmento Leite – 425, Porto Alegre, 90.050-170, Brazil

Abstract. *This numerical study uses Constructal design method to reduce the hot spots of a system which generates uniform heat per unit of volume by conduction. The idea is to facilitate the access of the heat flux through a Y-shaped pathways with different conductivities for the base and the branches. The shape of the system can vary subject to two constraints: the total volume and the volume of the high conductivity pathways. Material of several conductivities and volume fractions are studied. Preliminary results showed the applicability of Constructal Design for improvement of the thermal performance of the system. Using different conductivities for the base and the branches was obtained an improvement of more than 30%. The optimized geometry is the one which best distributes the imperfections, i.e. the hot spots (points of maximum temperature), which is in accordance with the principle of the optimal distribution of imperfections.*

Keywords: *Constructal design, Heat conduction, Y-shaped pathways, high conductivity materials*