

REFERÊNCIAS

- BLEUVIN, H. (1984) Analyse par la methode des elements finis des phenomenes magneto-thermiques - application aux systemes de chauffage par induction., Grenoble (França), Institute National Polytechnique de Grenoble. Tese de Docteur-Ingenieur.
- HOLMAN, J.P. (1983) Transferência de calor, São Paulo, McGraw-Hill. 639 p.
- LAVERS, J.D. (1983) Numerical solution methods for electroheat problems IEEE Trans. on Magn., MAG-19(6): 2566-2572, November.
- MASSÉ, Ph; MOREL, B.; BREVILLE, T. (1985) A finite element prediction correction scheme for magneto-thermal coupled problem during Curie transition, IEEE Trans. on Magn., MAG-21 (5): 1871-1873, September.
- MESQUITA, R.C. (1990) "Cálculo de campos eletromagnéticos tridimensionais utilizando elementos finitos: magnetostática, quase-estática e aquecimento indutivo", Tese de Doutorado, UFSC, 236 p.
- MESQUITA, R.C. & BASTOS, J.P.A. (1990) Solution of the TEAM Workshop problem 5 using a personal computer. COMPEL - The International Journal for Computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol-9 (Sup. A): 203-205.
- MESQUITA, R.C. & BASTOS, J.P.A. (1991) "3D Finite element solution of induction heating problems with efficient time-stepping". A ser publicado no IEEE Transactions on Magnetics em setembro.
- VÉRITÉ, J.C.; BUNOUF, G.; TANNEAU, G. (1989) Derniers developpements en calcul tridimensionnel de courants de Foucault. In: II Simpósio Franco-Brasileiro sobre cálculo de campos elétricos e magnéticos, São Paulo, Universidade de São Paulo.
- ZIENKIEWICZ, O.C.; WOOD, W.L.; HINE, N.W.; TAYLOR, R.L. (1984) "A unified set of single step algorithms - Part 1: General formulation and applications", Int. J. numer. methods eng., Vol-20: 1529-1552.

TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM SUPERFÍCIES ALETADAS:
INFLUÊNCIA DO PERFIL DE TEMPERATURA NA BASE DA ALETA

POR

JUCÁ, P.C.S.¹; PRATA, A.T.¹

RESUMO: O presente trabalho desenvolve um estudo sobre a transferência de calor bidimensional em aletas montadas em uma parede grossa. Efeitos da não uniformidade do perfil de temperatura na base da aleta assim como a depressão de temperatura devido a resistência térmica da parede são explorados para vários números de Biot e diferentes configurações geométricas.

INTRODUÇÃO

Aletas representam o arranjo físico mais conveniente e amplamente utilizado quando se deseja melhorar a transferência de calor entre uma superfície sólida e o meio que a cerca. A transferência de calor em aletas é um problema clássico que tem sido revisitado ao longo dos anos, tendo como referência padrão o livro de Kern e Kraus (1972).

A solução clássica do problema de transferência de calor em uma aleta é baseada em uma formulação unidimensional que assume temperatura uniforme ao longo da secção transversal. Esta hipótese é justificada quando o coeficiente de convecção entre a aleta e o fluido circundante é grande, quando comparado com a condutividade térmica do material da aleta. O principal parâmetro que governa a precisão desta solução clássica é o número de Biot transversal, $Bi = hW/k$, onde W é metade da espessura da aleta como mostrado na figura 1 a. Exceto para Bi muito menor do que a unidade esta solução fornece a resultados precisos e os erros rapidamente crescem com o crescimento do número de Biot. Isto limita a faixa de aplicação para a solução unidimensional.

Uma tentativa de melhorar a solução unidimensional foi feita por Aparecido e Cotta (1990). Estes empregaram a idéia de Menning e Ozisik (1985), de modo a desenvolver uma solução aproximada que leva em conta a não uniformidade do perfil de temperatura ao longo da secção transversal da aleta. A solução de Aparecido e Cotta mantém a simplicidade analítica da solução uni-dimensional clássica mas estende a faixa de aplicação para valores de Biot consideravelmente maiores.

Outro ponto a ser considerado é que a temperatura na base da aleta não é na verdade constante como é em geral assumido. A presença de uma superfície sólida a qual a aleta se encontra presa causa uma variação de temperatura ao longo da base da aleta como demonstrou Sparrow e Hennecke (1970) e Sparrow e Lee (1975).

Um trabalho que investiga os erros de magnitude na troca de calor oriundos da não uniformidade de temperatura na base da aleta foi recentemente realizado por Look (1989). O autor empregou um perfil de temperatura idealizado na base da aleta, na forma $T = T_b + a \cos(\pi y/2)$, onde $a = 0.2(T_b - T)$. Seu

¹ -Professores Adjuntos da Universidade Federal de Santa Catarina.

trabalho mostra que esta não uniformidade influencia fortemente o comportamento da aleta. Look também estudou o efeito de existirem diferentes coeficientes de convecção nas superfícies superior e inferior da aleta. De acordo com seu trabalho estas assimetrias não são importantes quando do estudo da variação do perfil de temperatura na base da aleta sobre seu comportamento.

O trabalho de Look motivou o presente estudo sobre o efeito de um perfil de temperatura não uniforme na base da aleta. No presente artigo uma situação mais abrangente é investigada. Como mostrado na figura 1a, a aleta se encontra ligada a uma parede grossa, como acontece na maioria das aplicações em engenharia. Uma temperatura constante é prescrita na parede oposta à aleta. Desta forma o perfil de temperatura na base da aleta é parte da solução e não é conhecido a priori como no trabalho de Look. O problema é resolvido numericamente através do método dos volumes finitos e os resultados são comparados com aqueles obtidos com a solução unidimensional de Aparecido e Cotta assim como a solução analítica bidimensional, ambas para temperatura constante na base da aleta.

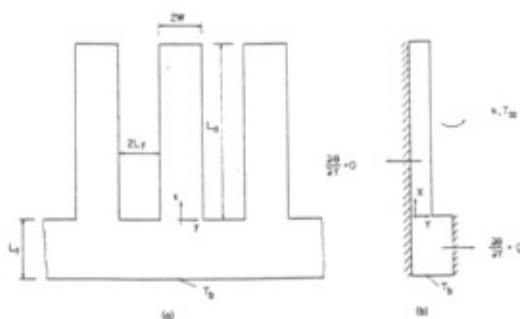


Figura 1. Geometria e condições de contorno do problema.

ANÁLISE

O problema a ser considerado é mostrado na figura 1a. Como visto na figura um conjunto de várias aletas é montado em uma parede cuja superfície interior esta na temperatura T_b . A temperatura do fluido circundante à T_∞ , e o coeficiente de transferência de calor entre as aletas e o fluido, h , é considerado constante ao longo de toda a superfície da aleta. Em função da simetria do problema, o domínio de solução pode ser assumido como mostrado na figura 1b. Todos os parâmetros geométricos são mostrados nas figuras 1a e b.

Para a aleta bidimensional mostrada na figura 1b a equação da condução pode ser escrita na forma adimensional como

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + G_1^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} = 0 \quad (1)$$

onde a adimensionalização adotada é

$$\theta = (T - T_\infty) / (T_b - T_\infty), \quad X = x / L_a, \quad Y = y / W \quad (2)$$

De acordo com a figura 1b, a equação (1) deve ser resolvida sujeita as seguintes condições de contorno,

$$\begin{aligned} X = -L_t / L_a, \quad 0 \leq Y < 1 + L_y / W \quad \theta = 1 \\ X = 0, \quad 1 \leq Y \leq 1 + L_y / W \quad \frac{\partial \theta}{\partial X} + Bi G_1 \theta = 0 \\ X = 1, \quad 0 \leq Y \leq 1 \quad \frac{\partial \theta}{\partial X} + Bi G_1 \theta = 0 \\ -L_t / L_a \leq X \leq 1, \quad Y = 0 \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \\ 0 \leq X \leq 1, \quad Y = 1 \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y} + Bi \theta = 0 \\ -L_t / L_a \leq X \leq 0, \quad Y = 1 + L_y / W \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

onde

$$Bi = hW/k, \quad G_1 = L_a / W \quad (4)$$

Além de Bi e G_1 , dois outros parâmetros adimensionais governam o problema: a espessura da parede G_2 e o espaçamento entre as aletas G_3 ,

$$G_2 = L_t / W, \quad G_3 = L_y / W \quad (5)$$

Neste trabalho Bi variou na faixa de 0.001 à 10, valores que são normalmente encontrados na aplicação de aletas; G_1 variou de 1 a 8, e G_2 de 0.1 a 5.0. O espaçamento adimensional entre aletas G_3 foi mantido constante e igual a 6. Uma vez determinado o campo de temperatura, a taxa de transferência de calor na base da aleta é determinada de acordo com

$$Q_o = q_o / [k(T_b - T_\infty)] = - \int_{-1}^1 \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{X=0} dY \quad (6)$$

onde q_o é a taxa de transferência de calor na base da aleta por unidade de comprimento ao longo da base.

A solução numérica da equação (1) foi obtida usando o método dos volumes finitos como descrito por Patankar (1978). Foram empregadas coordenadas cartesianas e o domínio irregular foi tratado através do método de condutividade variável proposto também por Patankar. Estas são práticas comuns, usualmente adotadas na literatura de transferência de calor, dispensando aqui maior elaboração.

A malha computacional depende do número de Bi sob estudo. Para valores de Biot menores que 1.0, uma malha de 30X30 pontos foi usada (direções X e Y) e para maiores valores de Biot a malha foi refinada, atingindo uma densidade de 60X60 pontos para $Bi = 10$. A malha era uniformemente espaçada na parede e na aleta.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 1 apresenta os resultados para a taxa de transferência de calor adimensional na base da aleta, Q_0 , para o caso limite onde a espessura da parede é zero ($G_2 = 0$) e uma temperatura uniforme é imposta sobre a base da aleta. Os valores de Q_0 foram calculados usando a solução exata bidimensional apresentada por Ozisik (1980), o modelo numérico aqui proposto, a solução unidimensional modificada de Aparecido e Cotta (1990), e a solução unidimensional clássica.

Tabela 1: Comparação entre as taxas de transferência de calor na base da aleta calculadas usando diferentes modelos, para perfil uniforme de temperatura na base.

Bi	G1	Exata ¹		Modificada ² Erro(%)	Numérica ³		Clássica ⁴	
		Q	Q		Q	Erro(%)	Q	Erro(%)
0,1	1	0,3547	0,3547	-0,008	0,3547	-0,008	0,3589	- 1,2
0,1	5	0,5956	0,5970	0,23	0,5955	-0,017	0,6052	- 1,6
1,0	1	1,852	1,823	-1,60	1,8500	0,073	2,000	- 8,0
1,0	5	1,806	1,789	-0,93	1,7990	-0,360	2,000	-11,0
10,0	1	4,316	3,548	-17,796	4,2770	-0,900	6,336	-47,0
10,0	5	4,091	3,381	-17,373	3,9520	-3,400	6,325	-55,0

- 1 Solução analítica exata bidimensional
- 2 Solução analítica modificada bidimensional, Aparecido e Cotta
- 3 Solução numérica do presente trabalho
- 3 Solução clássica unidimensional

O erro associado a cada uma das soluções aproximadas em relação à solução exata bidimensional é indicado na tabela 1. Como pode ser visto, tanto a solução unidimensional modificada de Aparecido e Cotta como a solução clássica incorrem em grandes erros para grandes valores de Biot.

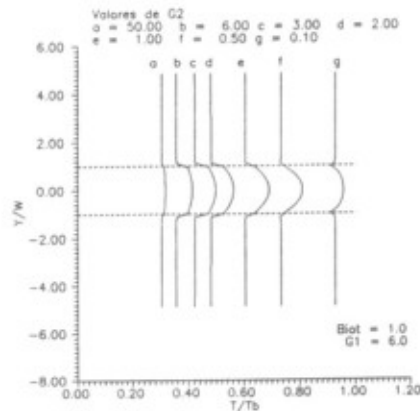


Figura 2. Perfis de temperatura

Para valores de G_2 diferentes de zero, a temperatura ao longo da base da aleta não é mais uniforme. Perfis de temperatura ao longo de Y , para $X = 0$ são apresentados na figura 2. Cada curva representa uma dada espessura adimensional G_2 . A região $-1 < Y < 1$, mostrada entre as linhas tracejadas corresponde à base da aleta. Pode ser visto que, exceto para valores muito grandes ou muito pequenos de G_2 , o perfil de temperaturas na base da aleta não pode ser considerado uniforme.

A dependência do perfil de temperatura com o número de Biot ao longo de Y para $X = 0$ é mostrada na figura 3. Para todos os casos apresentados $G_1 = G_3 = 6.0$ e $G_2 = 1.0$.

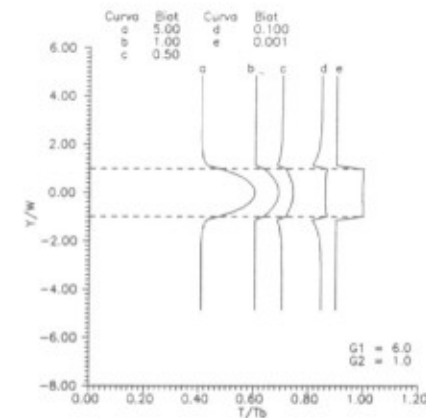


Figura 3. Influência do número de Biot

Novamente a região correspondente à base da aleta é mostrada entre linhas tracejadas. Como esperado, à medida que o número de Biot diminui o perfil de temperatura na base da aleta torna-se uniforme. Porém, o perfil de temperatura na base da aleta somente ser igual ao perfil da parede para valores de Biot menores que 0,001. Como visto na figura, mesmo para valores de Biot = 0,1 a temperatura na base da aleta é aproximadamente 14% menor do que T_b .

Resultados do perfil de temperatura ao longo de Y para $X = 0$ também foram obtidos para valores constantes de Biot, G_2 e G_3 e diferentes valores do comprimento adimensional da aleta G_1 . Pode-se observar que, para os valores investigados neste trabalho, o perfil de temperatura na base da aleta permanece virtualmente independente de G_1 .

De acordo com a discussão prévia, o uso da temperatura da parede no lugar do perfil real de temperaturas na base da aleta para calcular a taxa de transferência de calor da aleta, mesmo para valores de Biot da ordem de 0,1, pode resultar em erros graves. Este fato é melhor explorado com a ajuda da

figura 4 que mostra como a taxa adimensional de transferência de calor na base

da aleta, Q_0 , varia com Bi. A curva superior na figura 4 foi obtida usando a solução analítica bidimensional enquanto que a curva inferior corresponde aos resultados numéricos obtidos no presente trabalho. Para as soluções analíticas a temperatura na base da aleta foi tomada como sendo igual a T_b . Para ambas as soluções foi feito uso da equação (6). Deve-se notar que os resultados apresentados consideram $G_2 = 2$, isto é, a espessura da parede igual a duas vezes a espessura da aleta. Em geral G_2 assume valores maiores do que dois, o que aumentaria o desvio observado entre as duas curvas. Como visto na figura 4, mesmo para $Bi = 0,1$ a solução bidimensional analítica superestima Q_0 em 25%. O desvio entre as duas curvas é devido à não uniformidade de temperaturas na base assim como a depressão de temperatura associada à resistência térmica da parede.

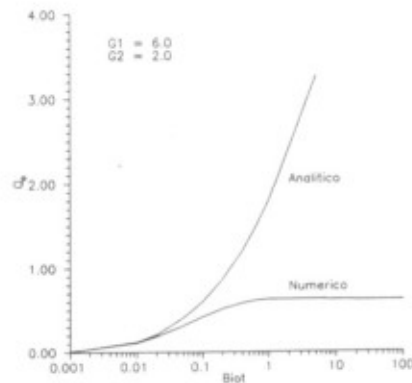


Figura 4. Transferência de calor na base da aleta

De acordo com os resultados mostrados, a inclusão de efeitos bidimensionais para considerar as não uniformidades de temperatura ao longo da secção transversal da aleta não pode ser justificada em situações práticas se a temperatura da base da aleta é mantida uniforme e igual a T_b . Este fato permanece como verdadeiro mesmo para aletas montadas em paredes finas e boas condutoras. Exceção ocorre para valores de Biot menores que 0,01. Porém para valores de Biot desta magnitude, ou menores, uma boa precisão é obtida empregando-se a solução clássica unidimensional e não existe assim razão para o emprego de soluções mais elaboradas, como observado na tabela 1.

Outro aspecto a ser explorado da figura 4 é que para a solução analítica o valor de Q_0 sempre cresce com o crescimento de Biot enquanto que para a solução numérica Q_0 atinge um determinado patamar ao longo do qual decresce suavemente com Bi. Isto pode ser explicado pelo fato de que para a solução analítica, como a temperatura T_b é prescrita na base da aleta, um aumento de Biot pode ser entendido como um aumento do coeficiente de transferência de calor, h , enquanto a condutividade térmica da parede, k , é mantida constante. Isto necessariamente leva a um aumento de Q_0 . Para a solução numérica o calor entregue para o fluido circundante através da aleta é limitado pela resistência térmica da parede.

Para números de Biot maiores que 10, Q_0 tende a diminuir para valores crescentes de Biot (resultados não apresentados na figura 4). Isto ocorre porque a resistência térmica imposta pela aleta induz o fluxo de calor a desviar da base da aleta, dirigindo-se diretamente da parede aquecida a T_b para a parede vertical resfriada cuja temperatura se aproxima de T_m à medida que o número de Biot cresce.

CONCLUSÕES

O presente trabalho desenvolveu um estudo sobre a transferência de calor bidimensional em aletas montadas em uma parede grossa. Efeitos da não uniformidade do perfil de temperatura na base da aleta assim como a depressão de temperatura devido a resistência térmica da parede foram explorados para vários números de Biot e diferentes configurações geométricas.

O perfil de temperatura na base da aleta é fortemente dependente do número de Biot e da espessura adimensional da parede, G_2 . Exceto para valores muito grandes ou muito pequenos de G_2 , a temperatura na base da aleta não pode ser assumida como uniforme, como em geral é adotado na literatura. Para o caso em que a aleta e a parede possuem espessura semelhantes foi mostrado que quando os valores de Bi são inferiores a 0,10 a temperatura na base da aleta é virtualmente uniforme, mas somente pode ser considerada igual à temperatura prescrita na parede para valores de Biot menores que 0,001.

Demonstrou-se que a prática comum de incluir efeitos bidimensionais para se levar em conta as não uniformidades de temperatura ao longo da secção transversal da aleta não se justifica em situações práticas se a temperatura de base da aleta é mantida uniforme. Em situações em que a aleta e a parede possuem aproximadamente a mesma espessura, somente para valores de Biot menores que 0,01 a resistência térmica da parede pode ser desconsiderada no cálculo da taxa de transferência de calor na base da aleta. Em geral, como as paredes são mais espessas este limite deve ser reduzido. Para valores de Biot desta ordem uma boa precisão pode ser obtida com o emprego do modelo unidimensional clássico e não existe necessidade de se empregar soluções mais elaboradas.

REFERÊNCIAS

- APARECIDO, J.B., COTTA, R.M., 1990, "Improved One-dimensional Fin Solutions", Heat Transfer Engineering 111, pp 49-59.
- BURMEISTER, L.C., 1979, "Triangular Fin Performance by the Heat Balance Integral Method", ASME J. Heat Transfer 101, pp 562-564.
- IREY, R.K., 1968, "Errors in the One-dimensional Fin Solution", ASME J. Heat Transfer, vol. 90, pp 175-176.
- KERN, D.A., KRAUS, A.D., 1972, Extended Surface Heat Transfer, MacGraw-Hill, New York.
- LAW, W., TAN, C.W., 1973, "Erros in One-dimensional Heat Transfer Analyses in Straight and Annular Fins", ASME J. Heat Transfer 95, pp 549-551.
- LOOK, D.C., 1989, "Two Dimensional Fin With Non-constant Root Temperature",

International J. Heat and Mass Transfer 32, pp 977-980.

MENNING, J., OZISIK, M.N., 1985, "Coupled Integral Equation Approach for Solving Melting or Solidification", International J. Heat and Mass Transfer 28, pp 1481-1485.

OZISIK, M.N., 1980, Heat Conduction, John Wiley, New York.

PATANKAR, S.V., 1978, "A Numerical Method for Conduction in Composite Materials, Flow in Irregular Geometries and Conjugate Heat Transfer", in Heat Transfer 1978: Proc. 6th International Heat Transfer Conference, Toronto, vol. 3, pp 297-302, Hemisphere, Washington D.C..

SNEIDER, A.D., KRAUS, A.D., 1983, "Recent Developments in the Analyses and Design of Extended Surfaces, ASME J. Heat Transfer 105, pp 302-306.

SPARROW, E.M., HENNECKE, D.K., 1970, "Temperature Depression at the Base of a Fin", ASME J. Heat Transfer 92, pp 204-206.

SPARROW, E.M., LEE, L., 1975, "Effects of fin Base-Temperature Depression in a Multifin Array", ASME J. Heat Transfer 97, pp 463-465.

MODELOS DE ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS EM JUNTAS TUBULARES

por

¹M.S.R.FREITAS, L.A.SOUZA, e N.F.F.EBECKEN

RESUMO -- Neste trabalho são estudados modelos para a propagação de trincas em juntas tubulares metálicas de plataformas marítimas utilizando-se elementos finitos isoparamétricos tridimensionais. São apresentados o modelo de linhas de mola e o método da extensão virtual da trinca. Através destes modelos são calculados os fatores de intensidade de tensões e a taxa de dissipação de energia. Apresenta-se os resultados de uma junta tubular T e indica-se algumas recomendações.

INTRODUÇÃO

A mecânica da fratura linear elástica tem um destacado papel nas estruturas metálicas marítimas utilizadas para a exploração de petróleo. O aparecimento de uma trinca em uma junta tubular de plataforma marítima poderá exigir a execução de um reparo que, neste caso, é tarefa longa devido a necessidade do projeto, da mobilização de mergulhadores, barcos, contratos comerciais e finalmente que o mar esteja suficientemente calmo para permitir a execução dos trabalhos.

O parâmetro mais importante da MFLE é o fator de intensidade de tensões K . Nas estruturas usuais o comportamento dos materiais é quase sempre dútil de modo que a importância prática do fator de intensidade de tensões decorre de uma lei experimental descoberta por Paris, segundo a qual a taxa de propagação da trinca é controlada pelo fator de intensidade de tensões.

O presente trabalho está limitado a MFLE. Analisa-se a importância da consideração dos modos I, II e III. Dois procedimentos são utilizados: o modelo de linhas de mola e método da extensão virtual da trinca. Finalmente, apresenta-se o resultado da análise de uma junta tubular T.

MODELO DE LINHAS DE MOLA

Quando se analisa a propagação de trincas superficiais (não-passantes) em estruturas tubulares recai-se sempre em um problema tridimensional o que torna a geração de dados demasiadamente complexa, além de implicar em excessivos esforços computacionais. Este problema se torna crítico quando se estende a

¹COPPE/UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro
Programa de Engenharia Civil - Bloco B sala 100 - 21945
Ilha do Fundão - Rio de Janeiro - RJ - Caixa Postal 68506
E-mail COC01031 AT UFRJ.BITNET